



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

## KOTLE NA TUHÁ PALIVA

BOILERS FOR SOLID FUEL

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondrej Mozola

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2019



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Ondrej Mozola**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Kotle na tuhá paliva

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Domovní vytápění tuhými palivy zažívá díky nízkým cenám paliva svoji reinkarnaci a to i přes velkou snahu snižování negativních ekologických vlivů tohoto zdroje.

Cílem práce je porovnání různých kotlů na tuhá paliva vhodných pro vytápění rodinných domů. Student se bude věnovat vhodným palivům a jejich vlastnostem, dále provede průzkum trhu s kotli na tuhá paliva a v závěru práce provede základní ekonomické posouzení vybraných typů kotlů.

### Cíle bakalářské práce:

- rešerše dostupných druhů tuhých paliva a jejich úprav pro domovní vytápění
- vlastnosti paliv a jejich vliv na kvalitu spalování
- přehled kotlů na tuhá paliva
- ekonomické posouzení vybraných druhů kotlů

### Seznam doporučené literatury:

BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.

MALÁŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. Biomasa pro výrobu energie. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. ISBN 978-80-213-1810-6.

QUASCHNING, Volker. Obnovitelné zdroje energií. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-2-7-3250-3.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

-----  
doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

ředitel ústavu

-----  
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

## **Abstrakt**

Hlavným cieľom tejto bakalárskej práce je rešerš rôznych druhov kotlov malých výkonov určených na vykurovanie rodinných domov. Prvá časť je venovaná charakteristike tuhých palív a výhodám alebo nevýhodám ich používania. Druhá časť je zameraná na zloženie tuhých palív a ich najdôležitejšie sledované vlastnosti. Tretia časť rozdeľuje kotle na tuhé palivá do rôznych kategórii. V poslednej časti bol prevedený porovnávací výpočet finančných nákladov na prevádzku konkrétnych kotlov na vykurovanie zvoleného rodinného domu.

## **Abstract**

Main goal of this bachelor thesis is a research about a different kinds of low performance boilers used for heating in family houses. First part is dedicated to characteristics of solid fuels and advantages or disadvantages of their usage. The second part is focused on composition of solid fuels and their most important observed properties. The third part divides boilers using solid fuels into different categories. Last part consists of comparative calculation of financial costs needed on heating in selected family house with different boilers.

## **Kľúčové slová**

Kotol, tuhé palivá, uhlie, biomasa, vykurovanie

## **Key words**

Boiler, solid fuels, coal, biomass, heating

### **Bibliografická citácia**

MOZOLA, Ondrej. *Kotle na tuhá paliva*. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Marek Baláš.

## **Prehlásenie**

Prehlasujem, že som svoju bakalársku prácu na tému: *Kotle na tuhá paliva* vypracoval samostatne. K jej vypracovaniu boli použité zdroje informácií uvedené v zozname použitých zdrojov.

V Brne dňa 11.5. 2019

-----  
Ondrej Mozola

## **Pod'akovanie**

Moje pod'akovanie patrí vedúcemu mojej bakalárskej práce doc. Ing. Marekovi Balášovi, Ph.D. za odborné rady a pripomienky poskytnuté pri vypracovávaní bakalárskej práce.



## Obsah

Úvod .....	11
<b>1 Druhy palív .....</b>	<b>12</b>
1.1 História používania tuhých palív .....	12
1.2 Biomasa .....	13
1.2.1 Surové drevo .....	14
1.2.2 Drevené brikety .....	15
1.2.3 Drevené pelety .....	15
1.3 Uhlie.....	16
1.3.1 Čierne uhlie .....	17
1.3.2 Hnedé uhlie .....	18
1.3.3 Koks .....	18
1.4 Odpadové palivá .....	18
<b>2 Zloženie tuhých palív .....</b>	<b>20</b>
2.1 Hrubý rozbor .....	20
2.1.1 Voda .....	20
2.1.2 Popolovina.....	20
2.1.3 Horľavina .....	21
2.2 Vlastnosti palív .....	21
2.2.1 Spalné teplo .....	21
2.2.2 Výhrevnosť .....	22
2.2.3 Obsah síry .....	24
<b>3 Kotle na tuhé palivo.....</b>	<b>25</b>
3.1 Účinnosť.....	25
3.2 Straty kotla .....	27
3.3 Delenie kotlov na tuhé palivo .....	28
3.3.1 Podľa technológie spaľovania.....	28
3.3.2 Podľa druhu paliva.....	31
3.3.3 Podľa prívodu paliva .....	32
<b>4 Porovnanie vybraných kotlov na tuhé palivá .....</b>	<b>34</b>
4.1 Automatický kombinovaný kotol VIGAS 12DPA .....	35
4.2 Prehorievací kotol Viadrus Hercules U26 ECO na uhlie .....	36
4.3 Splyňovací kotol ATMOS C15S.....	37
4.4 Porovnávací výpočet nákladov na prevádzku.....	38
4.4.1 Výpočet nákladov pre kotol VIGAS 12DPA.....	39

4.4.2	Výpočet nákladov pre kotol Viadrus Hercules U26 ECO .....	39
4.4.3	Výpočet nákladov pre kotol ATMOS C15S .....	40
4.5	Záverečné zhodnotenie výsledkov .....	40
<b>Záver</b>	.....	<b>42</b>
<b>Zoznam použitých zdrojov</b>	.....	<b>43</b>
<b>Zoznam symbolov</b>	.....	<b>46</b>

## Úvod

Horenie je základná chemická reakcia, kde sa z paliva získava tepelná energia. Tá je veľmi dôležitá pre fungovanie ľudí vo viacerých smeroch. Ide hlavne o vykurovanie objektov, či už sú to rodinné domy alebo byty, ale aj nebytových priestorov ako sú haly a sklady. Ďalším využitím je ohrev úžitkovej teplej vody. Veľmi dôležitou je aj výroba elektrickej energie v tepelných elektrárňach.

Základné delenie používaných palív je podľa ich skupenstva. Čo sa týka tuhých palív, poznáme dva základné typy: biomasu a uhlie. Biomasa bola ako obnoviteľný zdroj používaná už od počiatkov ľudskej civilizácie. Uhlie patrí medzi fosílné palivá, jeho zásoby sú ale stále dostatočné na to, aby si udržalo dôležitý význam. Najväčšiu popularitu malo v časoch priemyselnej revolúcie, dnes sa taktiež využíva hlavne v priemysle.

Zariadením, ktoré umožňuje premieňať energiu paliva na teplo je kotol. Prvými takýmito zariadeniami boli otvorené ohniská, ktoré majú aj dnes svoj význam ako doplnkové zdroje tepla. Klasické spaľovanie paliva je v dnešných moderných kotloch vytláčané do úzadia a nahradzované perspektívnejšou technológiou splyňovania. Trend pri konštruovaní kotlov je docieľiť čo najvyššiu účinnosť a tým redukovať spotrebu paliva a zároveň obmedziť dopad vzniknutých spalín na životné prostredie.

Hlavným cieľom prvej časti bakalárskej práce bude urobiť prehľad o najdôležitejších formách tuhých palív a vyzdvihnúť pozitíva a negatíva ich používania. Taktiež budú palivá rozoberané z technického hľadiska, kde bude spomenuté ich zloženie a sledované vlastnosti. Druhá polovica bude venovaná samotným kotlom na tuhé palivá. Popísané budú rôzne druhy strát tepelnej energie pri vykurovaní a kotle budú rozdelené do kategórií podľa viacerých parametrov. Následne bude prevedené porovnanie finančných nákladov prevádzky troch konkrétnych kotlov zastupujúcich rôzne kategórie. V závere budú výsledky zhodnotené.

## 1 Druhy palív

Palivom môžeme nazvať akúkoľvek látku, ktorá za vhodných podmienok dokáže horieť a ako produkt tejto chemickej reakcie vytvárať tepelnú energiu. Základné delenie palív je podľa ich skupenstva na:

- Tuhé (drevo, uhlie)
- Kvapalné (benzín, nafta, topný olej)
- Plynné (zemný plyn, LPG, svietiplyn, propán-bután, vodík)

Pri tuhých palivách pod vhodné podmienky spadá hlavne prítomnosť kyslíku, nízka vlhkosť paliva a dostatočná teplota v spaľovacej komore. Ďalšie delenie je podľa pôvodu na:

- obnoviteľné (biomasa)
- neobnoviteľné (fosílné – ropa, uhlie, zemný plyn)
- odpadové (komunálne odpady)

Pod pojmom obnoviteľné si môžeme predstaviť vlastnosť, že v priebehu relatívne krátkeho času vieme zásoby daného paliva získať znova, suroviny na palivo sa prirodzene obnovujú, tým pádom sú nevyčerpatel'né. Sem radíme biomasu, ktorá sa v prírode obnovuje automaticky. Neobnoviteľné palivá predstavujú presný opak, na planéte sú ich určité zásoby a po ich vyčerpaní nemáme žiadny spôsob, ako ich zásoby doplniť. Nazývajú sa aj fosílné a radíme sem uhlie, ropu a zemný plyn.[1]

### 1.1 História používania tuhých palív

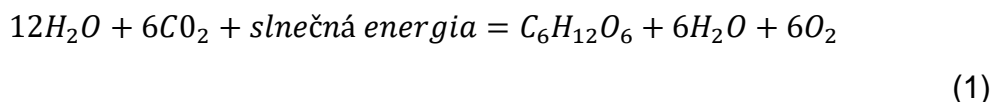
Používanie tuhých palív na získavanie energie bolo dôležitou súčasťou prežitia ľudstva už od nepamäti. Išlo ruka v ruke s objavením ohňa v praveku. Či už išlo o potrebu zahriať seba alebo spracovať potravu, biomasa vo forme surového dreva bola vždy najprirodzenejším palivom na spaľovanie. Fakt, že drevo je obnoviteľný zdroj, ho povýšila na kľúčovú formu získavania tepelnej energie od počiatkov ľudskej civilizácie až do dnes. Spočiatku sa drevo spaľovalo len na otvorenom ohni, čo neumožňovalo udržanie a tým dlhodobejšie využitie vzniknutého tepla. Zároveň všetko teplo unikalo do okolitého ovzdušia. Toto sa zmenilo, keď sa ľudia začali usádzať do obydľí a proces spaľovania sa presunul dovnútra. Zároveň však museli vyriešiť problém, ako odvádzať spaliny z uzavretého priestoru. Prvotné riešenia predstavovali vnútorné ohniská, nad ktorými boli diery v streche budovy, kadiaľ mohol dym unikať. Až neskôr sa začali využívať tehlové a kamenné uzavreté pece s komínom vyvádzajúcim spaliny von. Táto forma vykurovania sa postupne zdokonaľovala a využívame ju dodnes.

Ďalším najvyužívanejším tuhým palivom v priebehu ľudskej histórie je uhlie. Aj keď existujú záznamy o jeho používaní aj v dávnych dobách, veľký posun vo využívaní uhlia nastal až v priebehu 18. storočia v časoch priemyselnej revolúcie. Ľudstvo začalo výrazne technicky napredovať, k čomu bolo potrebné použiť energeticky výkonnejšie palivo. Do popredia sa teda vo veľkom priemysle a taktiež v doprave dostalo uhlie, aj kvôli vynálezu parného stroja.[6] Pre domové vytápanie však zostalo popri uhlí veľmi rozsiahlo využívané klasické drevo. Uhlie je fosílné neobnoviteľné palivo a nevydrží večne, preto ľudia začali hľadať nové a aj efektívnejšie a ekologickejšie formy paliva. V modernej dobe sa napríklad do popredia znovu dostávajú palivá založené na biomase, či už sú to drevné brikety alebo pelety. Taktiež palivá z energetických plodín, pestovaných priamo na účel spaľovania, ako napríklad kukurica, cukrová trstina a proso.[2] Na výrobu palív sa využíva aj rôzny biologický odpad

z poľnohospodárskych rastlín. Medzi netradičnejšie palivá môžeme zaradiť aj zdroje z odpadového materiálu, ktoré vznikli ako vedľajší produkt ľudskej činnosti. Sem patrí napríklad komunálny odpad ale aj kal z čističky odpadových vôd.[1] Hlavným využitím tuhých palív v dnešnej dobe je okrem klasického vykurovania napríklad aj výroba elektrickej energie v tepelných elektrárnach.

## 1.2 Biomasa

Pod pojmom biomasa si zjednodušene môžeme predstaviť všetko, čo má organický základ.[2] To znamená, že sem radíme palivá založené na živých organizmoch hlavne rastlinného pôvodu. Tým najrozšírenejším je drevo a palivá vyrábané buď z dreva samotného, ale hlavne z dreveného odpadu, čiže drevených zvyškov, odrezkov a štiepky. Takými palivami sú drevné brikety a drevné pelety. Ďalej medzi biomasu patrí aj ostatný biologický odpad. Môžu to byť rastlinné zbytky a odpady vzniknuté pri poľnohospodárstve z rastlín, ktoré boli primárne využívané na niečo iné. Inou skupinou sú takzvané energetické plodiny, ktoré sú pestované za účelom vytvorenia paliva pre budúce spaľovanie. Na základe tohto delíme rastlinnú biomasu podľa spôsobu získavania na zámerne pestovanú biomasu a odpadnú biomasu.[1] Základným procesom tvorby biomasy je fotosyntéza rastlín, to je premena slnečnej energie za prítomnosti vody a oxidu uhličitého na kyslík a biomasu vo forme sacharidov (glukóza). Najbežnejší vzorec chemickej reakcie kyslíkovej fotosyntézy je popísaný v rovnici 1:



Účinnosť procesu fotosyntézy v celosvetovom rozsahu je na úrovni 0,14 %. Aj keď sa zdá táto účinnosť malá, novej biomasy vzniká viac než dostatočné množstvo. Človek však energeticky využíva približne len 4 % novovzniknutej biomasy.[2] Výroba konkrétneho druhu paliva z vyššie uvedených biologických surovín sa líši použitými surovinami a spôsobom ich spracovania. Najčastejšie sa biosurovinu sušia a následne lisujú do foriem (brikety) alebo tvarujú do výhodných tvarov na skladovanie, presúvanie a spaľovanie.

Základnými vlastnosťami dreva a biomasy z hľadiska zloženia je v porovnaní s uhlím nízky obsah popoloviny na úrovni 0,6-1,6 %. Síra sa v biomase nevyskytuje vôbec, čo je hlavným dôvodom menšieho vplyvu spalín na životné prostredie. Výhrevnosť takýchto palív sa pohybuje na úrovni zhruba 19 MJ/kg, jej hodnota však výrazne závisí na obsahu vody v palive. Ten je premenlivý a pohybuje sa v rozsahu od 10 % do 65 %.

Do budúcnosti budú podľa môjho názoru organické palivá z obnoviteľných zdrojov ako biomasa preberať hlavnú úlohu pri vykurovaní akýchkoľvek objektov na dosiahnutie adekvátneho tepelného komfortu. Odklon od fosílnych palív je žiadúci hlavne z ekologického hľadiska. Dôležité bude, ako efektívne dokáže ľudstvo využiť tieto zdroje neustále poskytované našou planétou. Ďalším cieľom by mal byť posun limitov palív a spaľovacích zariadení z technického hľadiska, optimalizácia a rozšírenie ich výroby a zvýšenie popularity biopalív medzi užívateľmi.

### 1.2.1 Surové drevo

Ako už bolo spomenuté vyššie, drevo je a vždy bolo najprirodzenejšou, najrozšírenejšou a z určitého hľadiska najjednoduchšie využiteľnou surovinou pre tuhé palivá. Pri využívaní surového dreva na vykurovanie totiž takmer úplne vypadáva fáza spracovania surovín na palivo, keďže drevo má všetky potrebné vlastnosti na spaľovanie už v surovom stave. Vyťažené drevo je potrebné len narezať na rovnakú dĺžku, vhodnú na prepravu, a následne ešte na dĺžku vhodnú na umiestnenie do spaľovacieho zariadenia (kotel, krb). Pri rozrezávaní a aj pri ťažení dreva vzniká štiepka a iný drevený odpad, ktorý sa môže ďalej spracovávať a využiť tiež ako palivo.

Hlavnou výhodou surového dreva je jeho cena. Zo všetkých palív využívajúcich sa na vykurovanie je drevo jednoznačne najekonomickejšia možnosť. To je hlavný dôvod, prečo si stále zachováva takú popularitu, keď ide o kúrenie v rodinných domoch. Pri používaní kusového dreva však užívateľ musí rátať aj s negatívami. Jedným z nich je náročnejšia manipulácia s palivom a nutná častejšia obsluha spaľovacieho zariadenia. Kotle na drevo nie sú automatizované, takže je nutné pravidelné dokladanie polien do kotla a aj odstraňovanie popola. Ďalšou nevýhodou je náročnejšie skladovanie dreva, pretože zaberá značne viac priestoru ako napríklad brikety a pelety. Zároveň musí pre optimálne energetické využitie zostať v suchu, čo môže v zimných obdobiach vo vonkajších priestoroch častokrát predstavovať problém. Do budúcnosti vidím úlohu dreva skôr ako doplnok pri vykurovaní, kde ho postupne budú nahrádzať iné palivá. Drevo má však zatiaľ nenahraditeľnú úlohu pri kúrení v krboch a kachľových peciach, často využívaných na chatách ale aj domoch bez centrálného kúrenia.

Určujúcou veličinou množstva dreva nie je jeho hmotnosť, ale objem. Keď sa bavíme o kusovom dreve, existujú tri priestorové miery značenia objemu drevnej hmoty v závislosti na tvare dreveného paliva a spôsobe jeho nakuľadania. Jednotlivé priestorové miery sú zobrazené na obrázku 1 a popis aj s približnými vzájomnými prevodmi zobrazuje tabuľka 1.

plm	plnometer = m <sup>3</sup>		kocka s hranou 1 m vyplnená drevom bez vzduchových medzier
prm	priestorový meter skladaný	1 prm = 0,6 až 0,7 plm	kocka s hranou 1 m vyplnená čiastočne drevom so vzduchovými medzerami
prms	priestorový meter sypaný	1 prms = cca 0,4 plm	1 m <sup>3</sup> voľne ukladaného sypaného drobného alebo drveného dreva

Tabuľka 1: Popis a prevodové miery objemových metrov dreva [21]



Obrázok 1: Názorné zobrazenie objemových metrov dreva [22]

### 1.2.2 Drevené brikety

Ďalšou veľmi rozšírenou formou vykurovania sú drevené brikety. Ako surovina na výrobu sa využíva drevený odpad hlavne zrnitého typu, ktorý vzniká pri spracovávaní surového dreva. Podmienkou je vlhkosť do 20 %, inak sa môžu vo výslednom tvare rozpadnúť.[4] Vyrábané sú sušením a následným lisovaním do foriem, väčšinou do tvaru valca. Výsledný tvar a rozmery sú však pre efektivitu spaľovania nepodstatné. Spojenie a udržanie tvaru je zabezpečené lignínom, ktorý je prirodzene obsiahnutý v dreve v dostatočnom množstve.[2] To umožňuje v procese lisovania vynechať akékoľvek dodatočné chemické spojivá.

Využitie drevených brikiet ako palivo prichádza do úvahy hlavne v domácnostiach, kde nahradzujú klasické uhlie. Hlavnou výhodou je, že sú oveľa ekologickejšie v porovnaní s uhlím. Pri procese výroby je kladený veľký dôraz na dosiahnutie nízkej vlhkosti z dôvodu udržania relatívne vysokej výhrevnosti na úrovni 12,5 až 15 MJ/kg a taktiež kvôli zabráneniu rozpadávania sa výsledného produktu.[4] Drevený odpad s vyššou vlhkosťou je nutné dodatočne sušiť, čo celú technológiu zbytočne predražuje. To sa premietne aj do nákladov na vykurovanie drevenými briketami pre užívateľa. S limitovaním vlhkosti sú spojené aj nároky na skladovanie, užívateľ teda musí brikety držať na suchom mieste najlepšie vnútri.

### 1.2.3 Drevené pelety

Drevené pelety môžeme charakterizovať ako granule kruhového prierezu (6 až 14 mm) a normovanej dĺžky (1-5 cm).[3] Vyrábané sú vysokotlakovým lisovaním bez prídavného chemického spojiva, rovnako ako brikety. Rozdiel oproti briketám je hlavne v ich tvare a veľkosti.[3] Vyrábajú sa výhradne z biomasy na drevnom základe, to znamená z dreva, pilín a ostatného drevného odpadu.

Hlavnou výhodou peliet oproti ostatným palivám je jednoduchá obsluha pri pravidelnom kúrení napríklad v rodinnom dome. Ich normované rozmery totiž umožňujú použitie dopravníkov, ktoré sami dodávajú nastavené množstvo zo zásobníka do spaľovacej komory. Komfort obsluhy je teda značne vyšší ako v predchádzajúcich prípadoch. Na užívateľovi zostane len pravidelné dopĺňanie peliet do zásobníka. Ten však vydrží pri bežnom používaní aj niekoľko dní, závisí to samozrejme od veľkosti zásobníka a od toho, koľko tepla chceme z kotla dostať. Užívateľ je úplne oslobodený od prikladania niekoľkokrát denne, ako to je pri kusovom dreve alebo briketách. Táto vlastnosť podľa môjho názoru robí z peliet jedno

z najpohodlnejších palív v súčasnosti. K tomu prispieva aj fakt, že väčšina moderných kotlov spaľujúcich pelety je plne automatizovaná. To v praxi znamená, že používateľ si len jednoducho do riadiacej jednotky nastaví, koľko stupňov chce mať v objekte a viac sa nemusí kúrením trápiť. Systém si už namiesto neho bude dávkovať množstvo peliet. Tak isto si vie nastaviť čas, kedy sa má začať spaľovať a kedy sa má kotol úplne vypnúť. Toto je výborné riešenie pre menšie objekty ako rodinné domy, ale aj väčšie haly a sklady. Nič podobné pri používaní surovej formy kusového dreva možné nie je.

Ďalšími, možno ešte dôležitejšími, prednosťami peliet sú ich výborné vlastnosti. Majú nízky obsah popolovín, čo výrazne zlepšuje množstvo nežiadúcich látok vznikajúcich pri spaľovaní. Tým, že sú pri spracovaní sušené, majú nízky obsah vody, čo má za následok zvýšenie ich tepelnej účinnosti a v konečnom dôsledku aj celkovej výhrevnosti.[3] Medzi negatíva môžeme zaradiť ich slabšie rozšírenie, hlavne v dôsledku neznalosti bežných ľudí, ktorí sú zvyknutí kúriť drevom alebo napríklad koksom. Ďalšou vecou je nutnosť špeciálneho kotla spolu so zásobníkom pristaveným hneď vedľa kotla. S tým sú spojené aj vyššie nároky na priestor v kotolni, respektíve v miestnosti, kde je kotol umiestnený. Kotol musí byť prispôsobený na spaľovanie peliet. Asi je zrejmé, že pelety nie sú vhodné na kúrenie napríklad v krbe. Kúpa takéhoto systému na kúrenie je často finančne náročnejšia ako obyčajný kotol na drevo, respektíve uhlie. Aj samotné pelety sú vo vzťahu na získanú energiu drahším riešením ako kusové drevo. V konečnom dôsledku sú ale drevené pelety vážnym konkurentom dreva a uhlia pri vykurovaní rodinných domov hlavne z ekologického hľadiska a hľadiska komfortu obsluhy. Podľa môjho názoru bude ich popularita v budúcnosti len stúpať.



Obrázok 2: Drevené brikety[15]



Obrázok 3: Drevené pelety[16]

### 1.3 Uhlie

Ako už bolo spomenuté vyššie, uhlie je fosílné neobnoviteľné tuhé palivo. To znamená, že jeho zásoby sú obmedzené a nemôžeme sa na neho spoliehať naveky. Pri dnešnej frekvencii ťažby sa vyčerpanie celkových zásob hnedého uhlia odhaduje na 322 rokov a najstaršieho antracitu len na 134 rokov. Napriek tomu dnes fosílna palivá (uhlie, ropa, zemný plyn) tvoria celosvetovo až 75 % celkovej spotreby energie. Najväčšie množstvo a taktiež najväčšie zásoby uhlia majú 3 krajiny: Spojené štáty, Rusko a Čína.[6]

Uhlie vzniklo z rastlín, ktoré odumreli a spolu s bahnom vytvorili vzduchu neprístupnú zmes. Z tej sa v priebehu miliónov rokov pôsobením rôznych chemických a mikrobiologických procesov vytvorila tuhá hmota s energetickým potenciálom. Rýchlosť týchto procesov závisí hlavne na tepote a tlaku. S postupom času tieto hmoty



postupovali do vyšších hĺbok, čím dochádzalo k ich zhutňovaniu a odvodňovaniu za pôsobenia vyššej teploty a tlaku. Menilo sa aj ich chemické zloženie, kde vodík a kyslík začal nahrádzať uhlík.[6] Obsah uhlíku je spolu s geologickým vekom hlavným faktorom z hľadiska delenia uhlia. Rozlišujeme celkovo 5 druhov uhlia, ktoré sa výrazne líšia v obsahoch vody, uhlíka, síry ale aj obsahu a zložení popola. V poradí od najmladšieho po najstaršie uhlie sú to: rašelina, lignit, hnedé uhlie, čierne uhlie, antracit. Okrem toho rozlišujeme aj umelé tuhé uhoľné palivá, kam patria uhoľné brikety a koks.[1]

Ťažba uhlia je spojená s mnohými komplikáciami z hľadiska bezpečnosti a vyžaduje si použitie ťažkej techniky. Všeobecne rozlišujeme podľa dostupnosti zásob uhlia dve metódy ťažby: povrchová a hlbinná. Použitie správnej techniky ťažby je podmienené geológiou uhoľného ložiska a jeho okolia. Pri dolovaní je totiž nutné brať do úvahy riziko zrútenia tunela alebo šachty a tak isto úniku metánu, ktorý môže spôsobiť pod zemou výbuch. V dnešnej dobe však na tieto problémy existujú prísne normy, ktoré nútia prevádzkovateľov dolov urobiť všetko pre zamedzenie vzniku prípadných nešťastí.[6]

### 1.3.1 Čierne uhlie

Čierne uhlie svojím geologickým vekom patrí medzi najstaršie druhy uhlia. Vyznačuje sa vysokým obsahom uhlíka, čo súvisí s vysokým spalným teplom a výhrevnosťou. Na druhej strane sa staršie palivá horšie zapalujú a na horenie potrebujú vyššie teploty, čo je spôsobené nižším obsahom prchavej zložky horľaviny. To zároveň zabezpečuje menšie dymenie a nižšiu produkciu dechtu pri spaľovaní. V čiernom uhli je oproti hnedému taktiež nižší obsah síry, čo vedie ku ekologickejšiemu spaľovaniu.[1] Hlavným využitím čierneho uhlia je výroba koksu a elektrickej energie v tepelných elektrárnach.[9]

Vlastnosťou, ktorú sledujeme pri uhli je okrem hodnôt výhrevnosti hlavne zrornosť, iným slovom granulometria. Zjednodušene môžeme konštatovať, že vyjadruje veľkosť jednotlivých kusov uhlia. Často je to kľúčová vlastnosť pri použití uhlia.[5]

Geologicky najstarším druhom čierneho uhlia je antracit. Ten sa vyznačuje veľmi vysokým obsahom uhlíka na úrovni 90 % a zároveň obsahom vody pod 5 %.[6] V porovnaní s inými druhmi uhlia produkuje najviac tepla a najmenej dymu s najmenším množstvom nečistôt. Jeho spaľovanie sa považuje za najčistejší druh spaľovania uhlia. Je tvrdý a od ostatných druhov uhlia ho vizuálne odlišuje kovový lesk povrchu. Jeho hlavné využitie je v tvorbe energie a v metalurgii.[10]



Obrázok 4: Antracit [8]



Obrázok 5: Čierne uhlie [11]

### 1.3.2 Hnedé uhlie

Hnedé uhlie je geologicky mladšie ako čierne uhlie. Vyznačuje sa nižším obsahom uhlíka ako čierne uhlie, čo sa prejavuje na jeho hnedej farbe. Z hľadiska výhrevnosti nedosahuje na úroveň čierneho uhlia. V jeho chemickom zložení sa vyskytuje viac síry a iných prímiesí, čo spôsobuje väčšiu záťaž na životné prostredie pri spaľovaní. Celkovo je považované za menej kvalitné ako čierne uhlie. To, že je mladšie však zapríčiňuje, že sa nenachádza v takej hĺbke ako čierne uhlie, tým pádom sú jeho ložiská ľahšie prístupné a ťažba je jednoduchšia. Na Slovensku, podobne ako v Českej republike, sa vyskytujú výhradne ložiská hnedého uhlia.[6]

### 1.3.3 Koks

Hlavným rozdielom, ktorý odlišuje koks od uhlia je fakt, že koks nevznikol prirodzene v prírode ale je vyrábaný človekom. Radíme ho medzi umelé uhoľné palivá. Vyrába sa z čierneho uhlia vysokoteplotnou karbonizáciou, ktorá spočíva v izolovaní uhlia od vzduchu a následnom zahrievaní nad teploty 1000 °C. Okrem koksu je produktom tejto reakcie aj plyn, ktorý vzniká z prchavej zložky uhlia a tvorí ho prevažne vodík a oxid uhoľnatý. Nazývame ho koksárenský plyn (pri nízkoteplotnej karbonizácii hnedého uhlia je to svietiplyn) a tiež sa používa na spaľovanie. Koks sa oproti ostatným tuhým palivám vyznačuje vysokou výhrevnosťou na úrovni 25 až 30 MJ/kg čo priamo súvisí s nižším obsahom prchavej zložky horľaviny. Náročnejšia výroba sa však prejavuje na jeho vyššej cene.[12]



Obrázok 6: Hnedé uhlie [13]



Obrázok 7: Koks[14]

## 1.4 Odpadové palivá

Odpad bude ľudstvo produkovať vždy a v dnešnej dobe ho produkujeme viac ako kedykoľvek predtým. Preto je len logické hľadať spôsoby, akými sa tieto zvyšky budú dať znova využiť. Po recyklácii je práve tvorba palív z komunálnych odpadov ideálnym spôsobom na ich opätovné zhodnocovanie.

Prvým krokom pri tvorbe paliva z komunálneho odpadu je vytriedenie častí, ktoré nemajú žiadny energetický potenciál alebo by ich spaľovanie mohlo mať výrazne negatívne vplyvy na životné prostredie. Tým sa myslí napríklad stavebný odpad, ale aj rôzne druhy batérií alebo žiaroviek. V tomto výrazne pomáha recyklácia samotných ľudí. Vhodný odpad sa ďalej podrví a prípadne zlisuje na tuhé palivo. Takto vzniknuté tuhé alternatívne palivo, inak označované aj skratkou TAP, môže mať výhrevnosť

v rozmedzí od 15 do 20 MJ/kg, v závislosti na type odpadu a jeho úpravy.[19] Rôzne druhy odpadových palív a ich vybrané vlastnosti sú zobrazené v tabuľke 2.

	Výhrevnosť [MJ/kg]	Voda [%]	Popolovina [%]	Prchavá horľavina [%]
Drevený odpad	15	15	0,7	72
Papierový odpad	14	8	0,6	70
PVC odpad	19	—	0,5	49
Kožené odrezky	18	14	5	58
Mestské odpady	4	12	60	—
Gumový odpad	13	—	63	36

Tabuľka 2: Charakteristiky tuhých odpadových palív .[1]

Využívanie komunálneho odpadu ako paliva šetrí ostatné, či už obnoviteľné alebo neobnoviteľné zdroje energie. Zároveň obmedzuje potrebu získavať energiu z potencionálnych potravinárskych výrobkov ako kukurica.[18] Neprehliadnuteľný benefit spočíva aj v úbytku odpadu, ktorý mieri na skládku. Takáto alternatívna forma spaľovania sa využíva napríklad v cementárňach ale aj v tepelných elektrárnach.[17]



Obrázok 8: Výroba tuhého alternatívneho paliva [17]

## 2 Zloženie tuhých palív

### 2.1 Hrubý rozbor

Pri zložení tuhých palív nás najviac zaujíma pomer medzi horľavinou  $h$ , popolovinou  $A$ , a vodou  $W$ . Ten sa určuje pri každom palive takzvaným hrubým rozborom. Dokopy tieto 3 časti tvoria 100 % celkového objemu paliva (rovnica 2). Horný index  $r$  značí, že sa jedná o obsahy v palive v surovom stave.[1]

$$h + A^r + W^r = 100\% \quad (2)$$

Základným rozdielom medzi nimi je ich energetický príspevok ku celkovej tepelnej energii vzniknutej pri spaľovaní paliva. Zatiaľ čo popolovina a voda nemajú žiadny energetický potenciál, horľavina je nositeľom všetkého tepla uvoľneného spaľovaním.[5] Cieľom je vždy minimalizovať množstvo popoloviny s vodou a tým pádom maximalizovať množstvo horľaviny.

#### 2.1.1 Voda

Voda sa nachádza v každom tuhom palive a jej chemicky viazanú časť sušením nevieme úplne odstrániť. Jej účinky sú čisto negatívne. Pri spaľovaní sa totiž mení na vodnú paru, na čo však potrebuje energiu. Tú pohlcuje z paliva a tým znižuje jeho celkovú výhrevnosť.[2] V plynnom skupenstve smeruje do komína a zvyšuje tak celkový objem spalín. V extrémnych prípadoch môže príliš vysoký obsah vody viesť ku nestabilite horenia.[5] Ďalším faktorom je, že zvyšuje váhu nespáleného paliva, čo zbytočne zvyšuje náročnosť na prepravu. Geologicky staršie palivá majú spravidla nižší obsah vody. Pri biomase sa obsah vody líši v závislosti na type a na spôsobe uskladnenia.

Množstvo vody v palive z biomasy charakterizujú 2 rôzne údaje: obsah vody a vlhkosť dreva. Zatiaľ čo obsah vody percentuálne vyjadruje hmotnosť vody obsiahnutej v palive vzťahnutú na celkovú hmotnosť paliva, vlhkosť udáva pomer hmotnosti vody a úplne suchého dreva.[2]

#### 2.1.2 Popolovina

Podobne ako voda sa popolovina tiež nepodieľa na vytváraní energie pri spaľovaní a je teda nežiadúcou súčasťou palív. Súhrnne môžeme popolovinu a vodu nazvať ako balast. Pre spaľovanie je optimálne čo najmenšie množstvo popoloviny v palive. Obsah popolovín v nespálenom palive je približne rovný tuhému zbytku vzniknutému po spálení. Ten je nevyužitelným odpadom po spálení, čiže čím menej popoloviny obsahuje palivo, tým menej odpadu je nutné odstraňovať. Do popoloviny radíme minerálne látky (uhlíčitany, kremičitany, sírany) obsiahnuté v tuhých palivách. Pri spaľovaní majú za následok vznik vyššie spomenutého tuhého zbytku, bežne známeho ako popol.[1] Ten sťažuje prístup kyslíku k palivu a musí sa zo spaľovacieho priestoru pravidelne vyberať, čo zvyšuje nutnosť obsluhy kotla. Čiastočky popola sa tiež usadzujú na vnútorných stenách kotla a komínového odvodu spalín, čo zhoršuje ich prietok a vedie k zníženiu rýchlosti spalín. Rozlišujeme 3 rôzne formy popoloviny, a to strusku, škvaru a popolček.

Pre popol sú charakteristické 4 teploty, ktoré určujú správanie popola pri rôznych teplotách. Sú nimi teplota sintrácie, mäknutia, tavenia a tečenia.[1] Vplyv na

ich hodnoty má hlavne chemické zloženie popola. Tieto teploty sú ďalej určujúce pre stavbu a prevádzku kotlov.

### 2.1.3 Horľavina

Horľavina ako jediná energeticky využiteľná časť paliva priamo súvisí s výslednou výhrevnosťou. V prípade tuhých palív je tvorená prevažne piatimi prvkami: uhlík, vodík, síra, dusík a kyslík.[1] Práve oxidácia uhlíku, vodíku a síry je chemická reakcia, pri ktorej vzniká tepelná energia. Informáciu o obsahu rôznych chemických prvkov v tuhých palivách dáva prvkový rozbor, ktorý pre najbežnejšie palivá zobrazuje tabuľka číslo 3.

	Antracit	Čierne uhlie	Hnedé uhlie	Lignit	Rašelina	Ihličnaté drevo	Listnaté drevo	Obilná slama
C [%]	83,7	74	72	63,3	57,5	51	50	40,7
H [%]	1,9	5,1	5	4,5	5,5	6,2	6,1	4,9
O [%]	2,3	7,9	16,4	19	35	42,2	43,3	35,8
N [%]	0,9	1,6	0,9	1	1,9	0,6	0,6	0,5
S [%]	0,7	2,3	0,4	1,1	0,1	0	0	0,1

Tabuľka 3: Prvkový rozbor vybraných tuhých palív [1]

Najdôležitejšou vlastnosťou, ktorú sledujeme pri horľavine paliva je obsah prchavej horľaviny. Jej množstvo sa určuje pri laboratórnej skúške z úbytku hmotnosti vzorku, žíhaného v uzavretom priestore na teplotu 850 °C po dobu 7 minút. Táto časť horľaviny sa uvoľňuje na začiatku spaľovania nad teplotami 250 °C, pomáha vznieteniu paliva a stabilizuje celý proces horenia. Zvyšnú časť horľaviny nazývame neprchavým zbytkom a je vo forme tuhého uhlíku.[1] Vo všeobecnosti platí, že čím staršie palivo, tým menej prchavého podielu a viac tuhého podielu obsahuje. To má za následok vyššie hodnoty výhrevnosti starších palív.

## 2.2 Vlastnosti palív

Pri hodnotení vlastností tuhých palív sa musíme pozerať na energetické a taktiež ekologické hľadisko. Hlavnými vlastnosťami charakterizujúcimi každé tuhé palivo sú výhrevnosť, spalné teplo a síratosť.

### 2.2.1 Spalné teplo

Spalné teplo má v princípe rovnakú definíciu, ako výhrevnosť. Obidve môžeme charakterizovať ako teplo, ktoré sa uvoľní pri dokonalom spálení jednotkového množstva paliva, kde sa spaliny ochladia na pôvodnú teplotu (20 °C). Dôležitým faktom však je, že pri spalnom teple berieme do úvahy, že vodná para v spalinách skondenzovala. To znamená, že sa uvoľní aj skupenské teplo vody. To vedie k tomu, že hodnota spalného tepla je vždy vyššia, ako hodnota výhrevnosti. Tieto hodnoty by sa rovnali, pokiaľ by sa v palive nevyskytovala žiadna voda. To je v realite nedosiahnuteľný stav, preto sa výhrevnosť nedá len tak ľahko odmerať. Naopak spalné teplo vieme experimentálne zistiť použitím kalorimetru ponoreného do vody.

Zapálením jednotkovej hmotnosti paliva v kalorimetri v kilogramoch vieme na základe tepelného rozdielu počas spaľovania, množstva ohriatej vody a tepelnej kapacity vody zistiť hodnotu vzniknutého tepla v kilojouloch.[7] Z toho vyplýva aj jednotka spalného tepla a zároveň aj výhrevnosti ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). Zo spalného tepla potom vieme prevodovým vzťahom medzi spalným teplom a výhrevnosťou (rovnica 3) dopočítať výhrevnosť paliva, ktorá je v praxi používaná viac. Výpočty účinnosti spaľovacích zariadení totiž vychádzajú práve z výhrevnosti, nie zo spalného tepla. Hlavným významom spalného tepla ako veličiny je teda možnosť ho laboratórne odmerať pre konkrétny druh paliva a následne prepočítať na výhrevnosť.

$$Q_i^r = Q_s - r \cdot (W^r + 8,94 \cdot H_2) \quad (3)$$

$Q_i^r [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	výhrevnosť paliva
$Q_s [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	spalné teplo
$W^r$	obsah vody v surovom palive
$H_2$	obsah vodíku v surovom palive
$r [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	výparné/kondenzačné teplo vody, $r = 2454 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

## 2.2.2 Výhrevnosť

Pojem výhrevnosť zjednodušene vyjadruje množstvo tepla získaného z jednotky paliva.[5] Presná definícia znie, že to je teplo uvoľnené dokonalým spálením 1 kg paliva pri ochladení spalín na  $20^\circ\text{C}$ , kde voda obsiahnutá v spalínach zostáva v plynnom skupenstve, to znamená, že neskondenzuje. Teoreticky môžeme rozlišovať výhrevnosť na výhrevnosť paliva, ktorá platí pre celý objem paliva, a výhrevnosť horľaviny, kde berieme do úvahy len horľavú zložku paliva, obsah balastných látok ju teda neovplyvňuje.[5] V praxi nás skôr zaujíma výhrevnosť celého objemu paliva a zároveň obsah balastných látok.

K číselným hodnotám výhrevnosti je možné sa dostať jednoduchým pomerom medzi vzniknutým teplom a hmotnosťou paliva. Presnejšie hodnoty vieme dostať z prevodového vzťahu spalného tepla, rozoberaného vyššie (rovnica 3), kde musíme poznať aj obsah vody a vodíku v nespálenom palive.

Výhrevnosť môžeme určovať aj na základe empirických vzťahov, pokiaľ poznáme hodnoty hrubého rozboru respektíve chemického zloženia a obsahu jednotlivých prvkov. Takýmto vzťahom je Mendelejevov vzorec, ktorý je možné použiť pri väčšine palív (rovnica 4).[1]

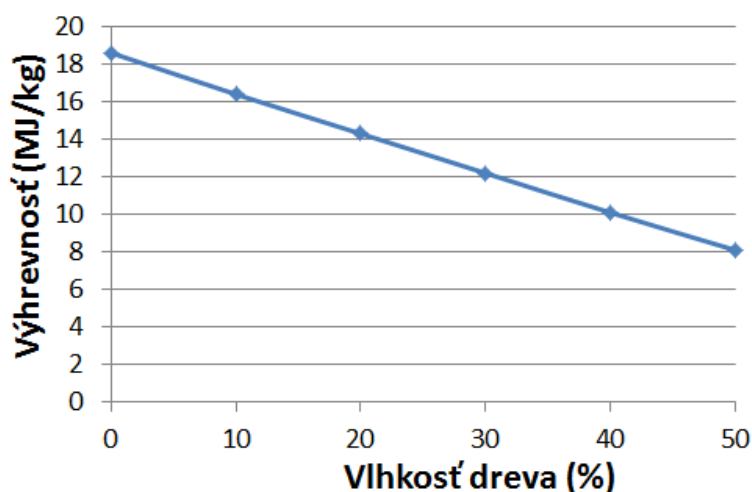
$$Q_i^r = 33910 \cdot C^r + 103000 \cdot H^r - 10900 \cdot (O^r - S^r) - 2453 \cdot W^r \quad (4)$$

$C^r, O^r, S^r$	obsahy jednotlivých prvkov
-----------------	----------------------------

Základným faktorom, ktorý ovplyvňuje výhrevnosť, je vlhkosť, respektíve obsah vody v palive. Podľa toho môže výsledná výhrevnosť tuhých palív veľmi kolísať. Napríklad pri čerstvo vyťaženom surovom dreve sa obsah vody pohybuje na úrovni 50 %, čo nám dáva výhrevnosť 7,8 MJ/kg. Pri vysušení dreva na obsah vody 15 % sa úroveň výhrevnosti posunie na hodnotu 15 MJ/kg, čo je takmer dvojnásobok. Takýto obsah vody vieme dosiahnuť sušením na poľená rozštiepaného dreva na slnku vo vonkajších priestoroch po dobu zhruba jedného roka.[2] Z toho je zrejmé, aké nesmierne dôležité je pre efektívne spaľovanie dôkladné sušenie tuhého paliva. V grafe číslo 1 môžeme vidieť, že výhrevnosť klesá so zvyšujúcou sa vlhkosťou paliva lineárne. Samozrejme sa výhrevnosti, rovnako ako aj rôzne ďalšie vlastnosti medzi rozličnými druhmi tuhého paliva, výrazne líšia, čo môžeme vidieť v tabuľke 4.

Palivo	Vlhkosť [%]	Výhrevnosť [MJ/kg]
Drevo kusové	25	14,6
Drevené brikety	25	18
Drevené pelety	25	18,5
Listnaté drevo	15	14,6
Listnaté drevo	50	7,6
Ihličnaté drevo	15	15,6
Ihličnaté drevo	50	8,2
Drevná štiepka	20	14,3
Obilná slama	10	15,5
Čierne uhlie		25,1
Hnedé uhlie		15,1
Koks		27,5

Tabuľka 4: Výhrevnosť vybraných tuhých palív [27]



Graf 1: Závislosť výhrevnosti dreva na vlhkosti [20]

### 2.2.3 Obsah síry

Vlastnosť inak nazývaná aj sírnatosť sa týka výhradne tuhých fosílnych palív, čiže uhlia. V biomase sa síra nevyskytuje vôbec. Jej obsah má síce energetický prínos, pretože patrí do prvkov horľaviny. Jej negatívny vplyv na životné prostredie však výrazne prevyšuje jej energetický potenciál, preto sa jej množstvo v palivách snažíme obmedziť.

Obsah síry sa delí na jej spáliteľnú časť a časť, ktorá zostáva obsiahnutá v tuhých zbytkoch. Spáliteľná síra tvorí zhruba 65 % všetkej síry obsiahnutej v palive.[1] Pri procese spaľovania oxiduje a odchádza v spalinách vo forme oxidu siričitého. Túto reakciu vieme ovplyvniť obsahom vápniku v palive, ktorý tiež oxiduje a následne reaguje so vzniknutým oxidom siričitým. Spolu vytvárajú siričitan vápenatý, ktorý zostáva zachytený v tuhých zbytkoch, neuvoľní sa teda do ovzdušia. Vápnik teda prirodzene znižuje obsah síry v spalinách.[5] Okrem toho má síra nepriaznivé účinky na samotné spaľovanie, znižuje teploty popola a zvyšuje rosný bod spalín.[1]

Vlastnosť, ktorou hodnotíme obsah síry v palive je buď jej pomerný obsah vzťahnutý na celkový objem paliva alebo takzvaná merná sírnatosť  $\bar{S}$ , vyjadrujúca hmotnosť síry vzťahnutej ku výhrevnosti paliva. Pomer medzi týmito veličinami vyjadruje nasledujúci vzťah:

$$\bar{S} = \frac{10 \cdot S}{Q_i^r} \quad (5)$$

$\bar{S} [\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}]$	merná sírnatosť
$S [\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}]$	pomerný obsah síry
$Q_i^r [\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	výhrevnosť paliva



### 3 Kotle na tuhé palivo

Kotol môžeme charakterizovať ako zariadenie, ktorého úlohou je premena energetického potenciálu paliva na tepelnú energiu. To prebieha pomocou spaľovania paliva v spaľovacej komore. Vzniknutá tepelná energia je predávaná vode, ktorá funguje ako distribútor tepla do vykurovacej siete rúr a radiátorov vnútri miestností domu. Tým sa tepelná energia dostáva od kotla do objektu k užívateľom. Ako médium rozvádzajúce teplo nemusí byť použitá výhradne voda, túto funkciu môže plniť aj vzduch.

Základom pre efektívne získavanie energie z paliva je vytvorenie optimálnych podmienok pre horenie. V tom je zahrnutý dostatočný prívod vzduchu, obzvlášť kyslíka, dostatočné teploty v spaľovacej komore ale aj veľkosť a tvar ohniska. Všetky tieto faktory sa zohľadňujú pri konštrukcii kotla. Z toho vyplýva fakt, že dnešné kotle sú vo väčšine prípadov konštruované na jeden konkrétny typ paliva. Samozrejme to neplatí stopercentne, napríklad v kotloch určených na kusové drevo je väčšinou možné spaľovať aj drevené brikety a podobne. [24] Čo sa týka životnosti kotla na tuhé palivá, závisí to od obsluhy užívateľa počas doby používania. Pri správnej obsluhu kotol vydrží zhruba 30 rokov, pri nesprávnej sa jeho životnosť zníži na 10. [24]

#### 3.1 Účinnosť

Hlavným cieľom dnešných kotlov je dosiahnuť čo najvyššiu účinnosť spaľovania a zároveň znížiť množstvo emisií vyprodukovaných po spaľovaní a vypúšťaných komínom do ovzdušia. Účinnosť transformácie energie v palive na tepelnú energiu je najdôležitejším faktorom pri výbere kotla z hľadiska technického ale aj ekonomického. Čím vyššia je účinnosť spaľovacieho zariadenia, tým menšia bude spotreba paliva na požadovanú úroveň produkcie tepelnej energie. Z teoretického hľadiska účinnosť definujeme ako pomer výkonu a príkonu. Za výkon uvažujeme množstvo vyrobenej tepelnej energie obsiahnutej v pare a distribučnom médiu, príkon potom tvorí energia dodaná do spaľovacieho zariadenia v palive. [23] Tento pomer je zobrazený v rovnici 6. Účinnosť je bezrozmernou veličinou, pretože je definovaná ako pomer veličín s rovnakou jednotkou (najčastejšie kW). Častokrát sa ale násobí stovkou a následne sa vyjadruje v percentách.

$$\eta = \frac{\text{výkon}}{\text{príkon}} = \frac{P_v}{P_p} \quad (6)$$

Určenie účinnosti spaľovacieho zariadenia ako je kotol si vyžaduje rôzne merania a analýzy. Zároveň je nutné dodržiavať jednotné zásady a normované postupy, aby výsledky boli porovnateľné s ostatnými zariadeniami. Existujú dve základné metódy na stanovenie účinnosti kotla, a to priama a nepriama.

Priama metóda je v princípe jednoduchšia a vychádza z rovnice 6 a zo znalosti hodnôt výkonu kotla a príkonu v použitom palive. Výkon tepelného zariadenia je možné vyjadriť ako množstvo tepla obsiahnuté v distribučnom médiu, čiže vode. Do úvahy je však nutné brať fakt, že voda už pred predaním tepla vyprodukovaného v spaľovacej komore disponuje určitou hodnotou tepla. Toto je vo vzťahu na výpočet výkonu ošetrené teplotným rozdielom pred vstupom a po výstupe vody z kotla. Výpočet výkonu môžeme vidieť v rovnici 7. [23]

$$P_v = m_v \cdot c_v \cdot \Delta t \quad (7)$$

$P_v$ [kW]	výkon
$m_v$ [kg · s <sup>-1</sup> ]	množstvo vody
$c_v$ [kJ · kg <sup>-1</sup> · °C <sup>-1</sup> ]	merná tepelná kapacita vody
$\Delta t$ [°C]	teplotný rozdiel vody

Príkon tuhého paliva sa určí jednoducho z výhrevnosti paliva a množstva pridávaného paliva za jednotku času. Tento vzťah vyjadruje rovnica 8.

$$P_p = m_{paliva} \cdot Q_i^r \quad (8)$$

$P_p$ [kW]	príkon
$m_{paliva}$ [kg · s <sup>-1</sup> ]	množstvo paliva pridávané za sekundu
$Q_i^r$ [kJ · kg <sup>-1</sup> ]	výhrevnosť paliva

Priama metóda je síce najlogickejším prístupom k určeniu účinnosti, zároveň ale nie je možné ju použiť vo všetkých prípadoch. Problém môže nastať kvôli nutnosti presného zmerania vyprodukovaného tepla prenášaného do domu, čo je napríklad pri vnútorných spaľovacích zariadeniach ako krb alebo kachle náročné. Ďalej priama metóda neberie do úvahy faktor strát a rovnako nedáva informáciu o tom, kde ku týmto energetickým stratám dochádza. [25]

Naopak nepriama metóda tieto straty do výsledku zahŕňa. Funguje na úvahe, že výkon tepelného zariadenia bude rovný rozdielu príkonu v pridanom palive a sumy všetkých strát. Výsledná účinnosť je potom najvyššia možná účinnosť, to znamená 100 %, zmenšená o straty prítomné pri spaľovaní a vykurovaní procese. Tento vzťah je zrejmy z rovnice 9. [23]

$$\eta = 1 - \sum_1^i Z_i \quad (9)$$

$\eta$ [–]	účinnosť
$\sum_1^i Z_i$ [kW]	suma energetických strát

Nepriama metóda je početne náročnejšia, zároveň ale dáva reálnejší výsledok ako priama. Spaľovací proces totiž nie je dokonalý a určitá časť energie zostane vždy nevyužitá. Straty sú totiž prítomné stále a je fyzicky nemožné ich úplne eliminovať. To je hlavným dôvodom, prečo spaľovacie zariadenie nemôže mať stopercentnú účinnosť. Rôznym druhom a zdrojom energetických strát pri spaľovaní a vykurovaní sa venuje nasledujúca kapitola.

### 3.2 Straty kotla

Pod straty tepelnej energie produkovanej spaľovacím zariadením radíme všetku energiu, ktorá sa vo výsledku nedostane k užívateľom a neprispieva k zvyšovaniu tepla v objekte. Rôzne druhy strát nastávajú či už pri spaľovaní, alebo pri následnom presune tepelnej energie. Hlavné delenie strát je na: [23]

- Komínová strata
- Strata nespálenou horľavinou
- Strata fyzickým teplom tuhých zbytkov
- Strata zdieľaním tepla do okolia

Komínová strata, inak nazývaná aj strata citelným teplom spalín, charakterizuje teplo, ktoré uniká v spalinách komínom do ovzdušia. Toto teplo neprispieva ku ohrevu vody a po spaľovaní zostáva nevyužitá v spalinách. Strata je charakterizovaná teplotou, akú majú spaliny za spaľovacím zariadením ešte pred vstupom do komína. [25] U väčšiny moderných spaľovacích zariadení práve táto strata tvorí najväčší príspevok ku celkovým stratám. Je dominantná až natoľko, že pre približnú hodnotu účinnosti si môžeme dovoliť zdroje ostatných strát zanedbať. [23]

Strata nespálenou horľavinou sa tiež označuje ako strata nedopalkom. Udáva, aká časť z horľaviny paliva zostala nespálená a tým pádom energeticky nevyužitá. Táto strata je obsiahnutá buď v tuhých zvyškoch v popole alebo v plyných zvyškoch v spalinách. Je to strata spôsobená nedokonalým spaľovaním paliva. Keďže sú to zvyšky paliva, ktoré nezhoreli, nemohli prispieť ku tvorbe tepla. Tuhé nespálené zbytky zostávajú ako uhlík po spaľovaní v kotle a sú odvádzané spolu s popolom. Plyné skupenstvo nespálenej horľaviny predstavuje hlavne jedovatý oxid uhoľnatý. Je obsiahnutý v spalinách a následne vypúšťaný do ovzdušia, čo samozrejme negatívne vplyva na životné prostredie. Preto je dokonalé spaľovanie dôležité jednak z ekonomického a aj z ekologického hľadiska. Hodnota príspevku ku celkovým stratám je závislá na použítom palive a na spaľovacom zariadení. Strata v tuhom nedopalku sa pohybuje do 4 %, pri veľmi zlom spaľovaní uhoľných palív však môže byť až na úrovni 10 %. Strata plyným nedopalkom je pri vysokej koncentrácii oxidu uhoľnatého do 6 %. [25]

Strata teplom tuhých zbytkov vyjadruje to, že popol odstraňovaný z kotla má značnú teplotu po spaľovaní. Tým pádom po vybratí popola mimo kotla popol postupne chladne a tým odovzdáva teplo okolitému ovzdušiu. Táto energia je čisto stratová, lebo teplo odovzdané popolom vzduchu mimo spaľovacieho zariadenia pochopiteľne nemôže prispievať ku ohrevu vody. V niektorých prípadoch si však môžeme dovoliť nechať popol v spaľovacej komore vychladnúť. Tým pádom teplo, ktoré prijal, postupne odovzdáva vode v zásobníku. V takomto prípade môžeme stratu tepla tuhých zbytkov zanedbať. [23]

Strata zdieľaním tepla do okolia predstavuje únik tepelnej energie prestupom tepla cez okrajové steny vykurovacej zostavy. Jej hodnota je priamo spojená s tepelnou izoláciou stien kotla a aj celej sústavy rozvodových rúr. Konštrukcia a použité materiály v dnešných kotloch a taktiež prídavné izolačné vrstvy na rúrach vo veľkej miere eliminujú tento typ straty. Špeciálnym prípadom sú domové kachľové pece, kde práve prestup tepla cez steny pece je hlavným princípom šírenia tepla. V tomto prípade samozrejme takto prenesenú tepelnú energiu nemôžeme radiť medzi straty. [25]

### 3.3 Delenie kotlov na tuhé palivo

Kotle môžeme deliť do rôznych kategórií podľa viacerých vlastností, napríklad podľa použitého paliva, podľa spôsobu prívodu paliva alebo podľa technológie spaľovania. Všetky vyššie spomenuté vlastnosti sa výraznou mierou prejavujú do výslednej konštrukcie kotla. Nasledujúce kapitoly sa budú venovať kotlom pre ústredné kúrenie a ich deleniu podľa rozličných vlastností. Kotle môžeme deliť podľa technológie spaľovania na prehorievacie, odhorievacie a splyňovacie. Podľa druhu paliva ich delíme hlavne na kotle na uhlie, kotle na pelety a kotle na kusové drevo respektíve brikety. Podľa spôsobu prívodu paliva delíme kotle na manuálne a automatické. Taktiež môžeme kotle deliť podľa média rozvádzajúceho teplo na teplovodné a teplovzdušné.

Samostatnou kapitolou sú lokálne ohniská. Na základe delenia kotlov rozoberaného v nasledujúcich kapitolách by sme ich mohli zaradiť medzi kotle s prehorievacou technológiou spaľovania s manuálnym prikladaním paliva. Hlavným palivom je určite kusové drevo, prípadne brikety. Lokálne ohnisko predstavuje výborný a jednoduchý spôsob kúrenia v objektoch, kde sa nekúri pravidelne a kde sa neoplatí investovať do nákladnej vykurovacej zostavy, napríklad na víkendových chatách. Využitie nájdú aj ako doplnkový zdroj tepla na vykúrenie jednej miestnosti. V princípe je to vykurovacie zariadenie umiestnené vo vnútri miestností. Môže to byť napríklad krb alebo kachľová pec. Konštrukčne môže byť ohnisko buď uzavreté alebo otvorené. Teplo sa od neho šíri sálaním, takže tu nie je možnosť vykurovať príliš veľké priestory alebo viac miestností naraz. Negatívom je aj nízka účinnosť v porovnaní s klasickými kotlami, čo je spôsobené jednoduchosťou konštrukcie. Otázkou zostáva aj bezpečnosť vedenia ohniska vo vnútri, moderné zariadenia však majú tento faktor zabezpečený. Mnohí ľudia po takomto riešení siahajú hlavne kvôli príjemnému pocitu večerného posedenia pri ohni. [29]



Obrázok 9: Otvorené ohnisko [30]



Obrázok 10: Uzavreté ohnisko [31]

#### 3.3.1 Podľa technológie spaľovania

Prehorievacie kotle sú ekonomickejšim riešením vykurovania väčšinou spojeným s ručným dokladaním paliva. Princíp horenia spočíva v tom, že všetko palivo umiestnené v spaľovacej komore horí od dna kotla. Vzduch, ktorý poháňa toto horenie je privádzaný odspodu a zabezpečuje ťah cez celú spaľovaciu komoru smerom nahor. Zároveň je vzduch privádzaný aj nad dávku paliva, kde prebieha druhé spaľovanie

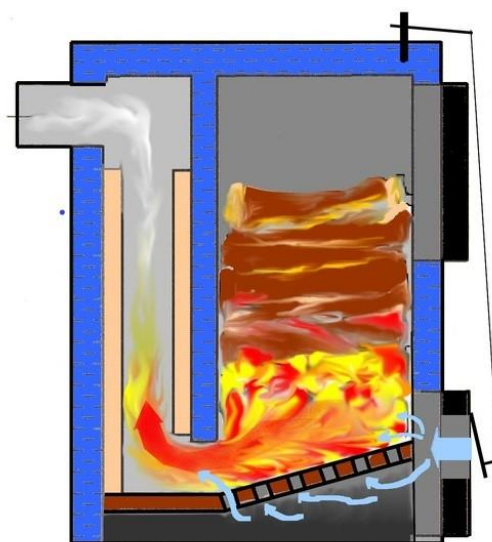
Palivo je prikladané dvierkami v hornej časti kotla, popol je odstraňovaný dvierkam v spodnej časti.

Hlavnou nevýhodou takéhoto riešenia je nemožnosť prispôbovať množstvo privedeného vzduchu do spaľovacej komory. To má za následok zvýšenú tvorbu nespálených uhlíkovodíkov a tým dochádza ku zvýšeniu emisii. Hlavným palivom spaľujúcim sa v prehorievacích kotloch je kusové drevo alebo uhlie. Najideálnejšou voľbou z hľadiska ekológie spaľovania je koks, pretože obsahuje menšie množstvo prchavej horľaviny. To znamená, že pri nedostatku vzduchu nedochádza ku zvýšenej tvorbe škodlivín v takej miere, ako to je pri dreve alebo hnedom uhlí. S pohľadom na cenu kotla je takéto konštrukčné riešenie najlepšou variantou. Z hľadiska ekológie je to však presný opak. Často je zvýšená produkcia škodlivín spojená aj s používaním lacných palív namiesto koksu. Napriek tomu sú prehorievacie kotle veľmi rozšírené v našich zemepisných šírkach hlavne v starších rodinných domoch výhradne kvôli celkovej cene. Sprísňujúce sa emisné normy by však mali postupne kotle tohto typu z trhu vytláčať. [24]

Odhorievacie kotle sú rovnako kotle s manuálnym prikladaním a prirodzeným prívodom vzduchu. Oproti prehorievacím sa líšia v smere prúdenia vzduchu. Vzduch je privádzaný do spodnej časti a spôsobuje horenie len určitej časti naloženého paliva v spodnej časti spaľovacej komory. Spolu so spalínami je potom odvádzaný pod ohnisko a preč zo spaľovacej komory. K tomu sa využíva prirodzený spodný ťah, v niektorých konštrukciách však tejto funkcii môže dopomáhať ventilátor. Vyprodukovaný popol prepadáva cez rošt do popolníka. Je možné lepšie regulovať prívod paliva a tým zvyšovať účinnosť a znižovať produkciu škodlivín. Celý proces horenia je oveľa stabilnejší ako pri prehorievacích kotloch, čo má za následok nižšiu produkciu emisii. Účinnosť oboch druhov sa pohybuje v rozmedzí 50 % až 80 % [24] Porovnanie konštrukcii prehorievacieho a odhorievacieho kotla vidíme na obrázkoch 11 a 12. Červená šípka znázorňuje smer spalín, modré šípky smer privádzaného vzduchu.



Obrázok 11: Prehorievací kotol [26]



Obrázok 12: Odhorievací kotol [26]

Splyňovacie kotle sú technologicky najmodernejšie dosahujúce veľmi vysoké účinnosti až na úroveň 90 %, pri automatizovanom splyňovaní tuhých palív aj mierne viac. Splyňovanie je jav, keď dochádza k uvoľňovaniu prchavej horľaviny. V princípe dochádza k tepelnému rozkladu pevného uhlíku v palive. Tento jav je prítomný pri všetkých druhoch spaľovania. Táto reakcia je však v predchádzajúcich spôsoboch spaľovania samovoľná a vo veľkej miere nevyužitá. Rozdiel pri splyňovacích kotloch spočíva práve v tom, že priebeh uvoľňovania prchavej horľaviny je značne kontrolovaný, rovnako ako aj prísun vzduchu zabezpečujúci jej dostatočné vyhorenie.[26]

Pri splyňovacích kotloch dochádza ku splyňovaniu uhlíka v inej komore ako samotné spaľovanie vzniknutého plynu. Palivo je umiestnené v zásobníku paliva, ktorý funguje zároveň ako splyňovacia komora. Je sem privádzaný vzduch s pretlakom vytváraný ventilátorom. Pevný uhlík sa horením mení na plyn, hlavne na oxid uhoľnatý. Zároveň termickým rozkladom paliva vznikajú ďalšie horľavé plyny. Zmes spalín a plynu je následne vedená do spaľovacej komory, kde sa privádza vzduch a dochádza tu ku spaľovaniu plynnej zmesi. Výsledkom je účinnejšie využitie energie v palive a zároveň výrazne znížená produkcia emisií, pretože výsledné spaliny vypúšťané komínom nie sú produktom priameho spaľovania tuhého paliva, ale jeho plynnej fázy. Schému splyňovacieho kotla v reze zo strany môžeme vidieť na obrázku 13. V tabuľke 5 môžeme vidieť porovnanie účinností a produkcie emisií CO (oxid uhoľnatý) a TZL (tuhé znečisťujúce látky) kotlov všetkých troch technológií spaľovania pre u nás najrozšírenejšie druhy palív, hnedé uhlie a kusové drevo.

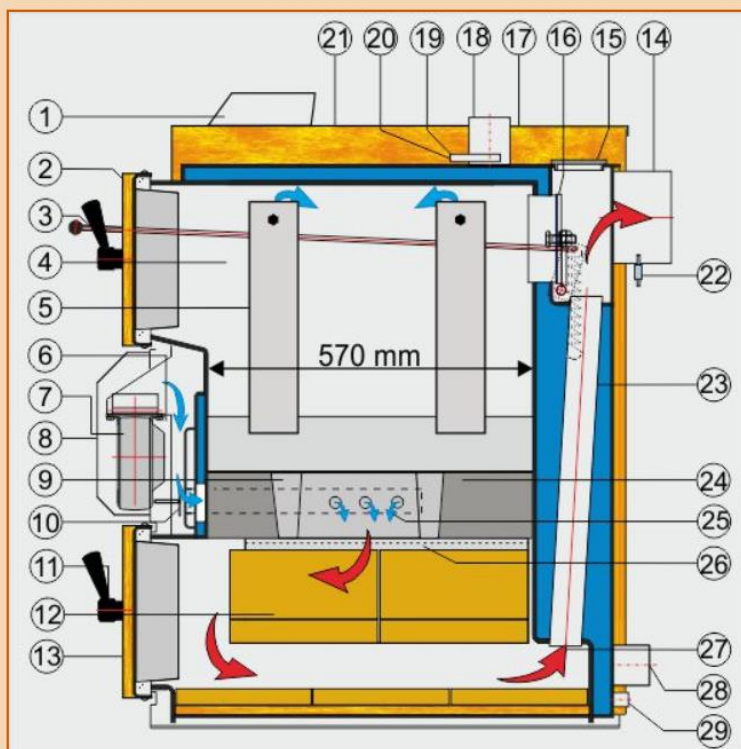
	emisie CO [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ]		emisie TLZ [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ]		účinnosť [%]	
	hnedé uhlie	kusové drevo	hnedé uhlie	kusové drevo	hnedé uhlie	kusové drevo
prehorievací	20000-30000	5000-25000	200-300	50-350	40-60	55-65
odhorievací	5000-15000	4000-15000	50-200	50-250	60-75	60-75
splyňovací	200-7000	200-6000	30-150	20-150	70-80	75-85

Tabuľka 5: Porovnanie účinnosti a produkcie emisií rôznych technológií spaľovania [26]



Schéma kotla

1. Regulácia AK 4000
2. Horné dvierka
3. Tiahlo komínovej klapky
4. Splyňovacia komora
5. Vedenie prim. vzduchu
6. Klapka vzduchu
7. Ventilátor
8. Kryt ventilátora
9. Žiarobetónová tryska
10. Clona sekund. vzduchu
11. Uzáver dvierok
12. Šamotové tehly
13. Spodné dvierka
14. Kominové hrdlo
15. Veko výmenníka
16. Zakurovacia klapka
17. Horný zadný kryt
18. Hrdlo výstupnej vody
19. Tepelná poistka
20. Kotlový teplomer
21. Horný predný kryt
22. Teplomer spalín
23. Rúry výmenníka
24. Žiarobetónová výmurovka
25. Sekundárny vzduch
26. Spaľovacia komora
27. Smer spalín
28. Hrdlo vratnej vody
29. Napúšťacie hrdlo



Obrázok 13: Splyňovací teplovodný kotol s popisom častí [28]

### 3.3.2 Podľa druhu paliva

Kotle na drevo sú najbežnejšie kotle a vyžadujú si ručnú obsluhu. Drevo minimálne v našich zemepisných šírkach drží prvenstvo medzi palivami z hľadiska používania, preto sú veľmi bohato zastúpené v slovenských a českých domácnostiach. Je možné v nich spaľovať aj drevené brikety, ktoré majú z hľadiska spaľovania podobné vlastnosti ako kusové drevo. Môžu byť konštrukčne zhotovené pre všetky tri vyššie spomenuté technológie spaľovania, dominantnou sa pri nových kotloch však stáva splyňovanie.

Kotle na pelety sú výhradne automatické. Ku kotlu je pripojený zásobník, do ktorého sa nasypú pelety. Mal by mať dostatočnú kapacitu na zabezpečenie chodu kotla na niekoľko dní. Pelety sú zo zásobníka automaticky odoberané dopravníkom podľa pokynov riadiacej jednotky. Pokiaľ je požiadavka tvorby tepla, pelety sú privádzané dopravníkom a dochádza ku zažehnutiu horáku. Následne prebieha v kotle samotné spaľovanie. V opačnom prípade, ak už nie je nutnosť privádzať teplo ku užívateľom, prívod paliva sa zastaví a spaľovanie sa po dohorení už privedeného paliva ukončí. Celý proces je automaticky regulovaný, čo zvyšuje komfort používania. Niektoré kotle navyše dokážu spaľovať popri peletách aj kusové drevo, ktoré sa však samozrejme musí manuálne prikladať. Takéto kombinované spaľovanie predstavuje strednú cestu medzi ekonomickým a pohodlným spôsobom vykurovania.[24]

Kotle na uhlie majú svoje zastúpenie hlavne v teplárňach a tepelných elektrárnach, prípadne iných priemyselných závodoch. V rodinných domoch sú používané buď staršie kotle s klasickým spaľovaním, modernejšou variantou vykurovania uhlím sú splyňovacie kotle. V priebehu rokov prešli kotle na uhlie

výraznými zmenami kvôli dodržaniu emisných limitov. Konštrukčne sú veľmi podobné kotlom na drevo, rozdiel je len v prívode vzduchu. Spaľovaním uhlia taktiež vzniká viac popola, ktorý sa musí častejšie vysýpať. Mnohé kotle sú teda hybridné a dokážu spaľovať drevo aj uhlie. Pri moderných kotloch je možná regulácia spaľovacieho procesu pomocou ventilátora na prívod vzduchu. Dnes sa často vyskytujú plne automatizované kotle na uhlie aj s prívodom paliva. Kotle na uhlie väčšinou dokážu spaľovať všetky druhy tuhých palív na uhoľnom základe, čiže hnedé a čierne uhlie, koks aj uhoľné brikety.[24]

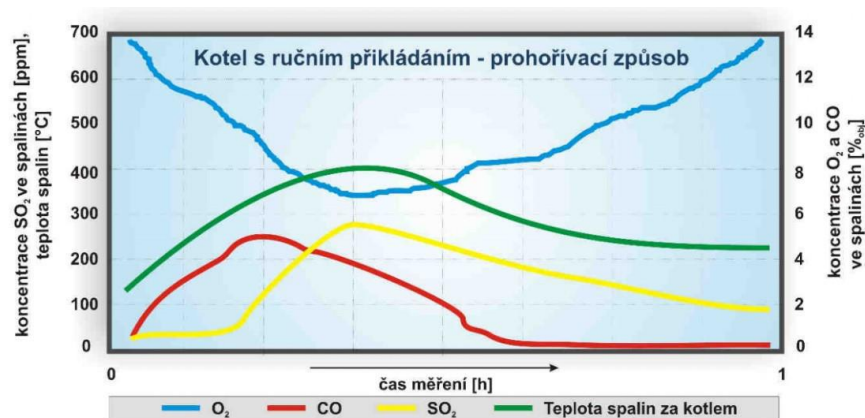
### 3.3.3 Podľa prívodu paliva

Kotle s manuálnym prikladaním sú charakteristické tým, že užívateľ musí na udržanie tepla v dome priebežne prikladať palivo do kotla. Takéto riešenie je konštrukčne oveľa jednoduchšie, čo sa prejaví na cene celého zariadenia. Kotle tohto typu sú častokrát výhradne na surové drevo alebo drevené brikety, čo sú palivá neumožňujúce automatizáciu dodávania paliva na spaľovanie kvôli rôznorodým tvarom jednotlivých kusov. Do tejto kategórie kotlov určite patria aj uzavreté lokálne ohniská vo vnútri domov. Častokrát sú manuálne kotle konštrukčne vyriešené tak, že majú veľkoobjemové ohnisko, do ktorého sa palivo prikladá cez dvierka na prednej strane. Dôvodom je možnosť naplniť spaľovací priestor veľkým množstvom paliva, čo predlžuje dobu, po ktorej je nutné ísť palivo znova prikladať. To je dôležité napríklad počas noci, aby do rána v kotle úplne nevyhasol plameň. Nevýhodou ručne ovládaných kotlov je určite vyššia náročnosť na celkovú obsluhu vykurovacieho zariadenia a vyššie množstvo vyprodukovaných škodlivín kvôli horším podmienkam spaľovania. Rýchlosť horenia totiž nie je konštantná, zatiaľ čo prívod vzduchu je nastaviteľný len manuálne a tým pádom ťažko prispôsobiteľný aktuálnej situácii v spaľovacom priestore. To má za následok horšie spaľovanie a viac vyprodukovaných škodlivín. [24]

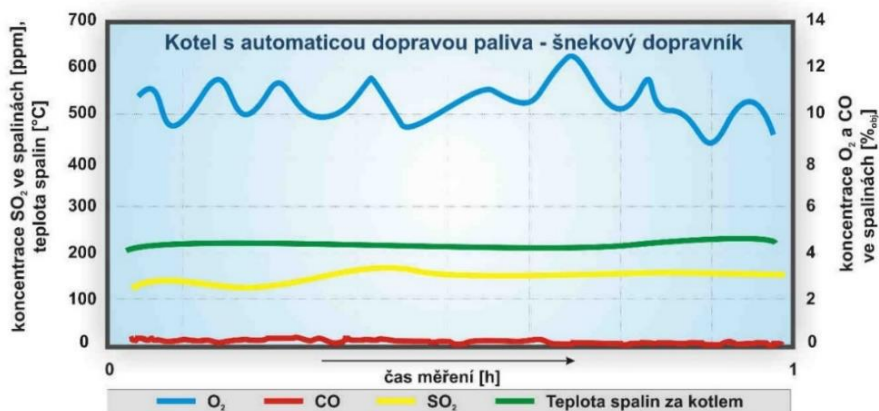
Automatické kotle sa vyznačujú vlastnosťou, že bez nutnej manuálnej obsluhy presúvajú palivo z príslušných zásobníkov do spaľovacieho zariadenia. Skladajú sa zo samotného kotla, zásobníka s palivom, dopravníka paliva medzi zásobníkom a kotlom a radiacej jednotky. Hlavným palivom, ktoré umožňuje naplno využiť tento typ vykurovania, sú drevené pelety. Ich normovaný tvar a veľkosť umožňuje konštrukčne prispôsobiť dopravník a ohnisko tak, aby sa cestou nikde nezasekli. Rovnako sa pri automatizovaných kotloch často využíva uhlie, ktoré je delené do tried podľa zrnitosti, čo tiež umožňuje skonštruovať kotol na konkrétne rozmery jednotlivých kusov paliva. Celý priebeh vykurovania je automatizovaný radiacou jednotkou, ktorá koordinuje všetky procesy a zabezpečuje prijímanie informácií od užívateľa. Ten len musí zadať, akú teplotu chce mať v dome a v akom časovom rozmedzí počas dňa. Taktiež musí dopĺňať zásobník, ale to stačí spraviť raz za niekoľko dní. Komfort automatizovaného vykurovania je teda výborný. Na druhú stranu je takýto spôsob finančne náročnejší čo sa týka paliva. Automatizované kotle sú taktiež konštrukčne náročnejšie a tým pádom drahšie. Kontinuálne dodávanie paliva však zaručuje stabilitu procesu spaľovania, zabraňuje kolísaniu úrovne výkonu a vykazuje vysokú účinnosť. Automatické kotle taktiež produkujú menšie množstvo škodlivín v porovnaní s manuálnymi kotlami, pretože vedú prispôsobiť prísun vzduchu podľa okamžitej rýchlosti horenia a tým



skvalitniť proces spaľovania. [24] Pri automatickom splyňovaní drevených peliet sú emisie oxidu uhoľnatého do  $600 \text{ mg/m}^3$ . To je v porovnaní s ostatnými palivami značne menej ako môžeme vidieť v tabuľke 5. [26] Porovnanie manuálneho a automatického kotla z hľadiska koncentrácie škodlivín v spalinách v priebehu 1 hodiny je zobrazené na grafoch 2 a 3.



Graf 2: Priebeh koncentrácií látok v spalinách – manuálne prikladanie [24]



Graf 3: Priebeh koncentrácií látok v spalinách – automatické prikladanie [24]

## 4 Porovnanie vybraných kotlov na tuhé palivá

Nasledujúca kapitola bude venovaná trom vybraným kotlom od rôznych výrobcov. Každý bude zastupovať inú kategóriu na vytvorenie prehľadu pre kupujúceho, aké možnosti mu dnešný trh ponúka. Kotle budú vzájomne porovnávané z ekonomického hľadiska. Hlavné sledované faktory budú ročné náklady na prevádzku a cena kotla. Všetky výpočty sa budú vzťahovať na rovnaký rodinný dom a kotle budú z rovnakej výkonnostnej kategórie do 20 kW. Väčšina výrobcov pôsobiach v Česku a na Slovensku ponúka takmer výhradne splyňovacie kotle. Pre európsky trh totiž platia prísne emisné normy, ktoré kotle s prehorievacou a odhorievacou technológiou spaľovania jednoducho nedokážu spĺňať. Preto je počet typov takýchto kotlov na trhu nízky. Mnohí výrobcovia dokonca ich výrobu úplne ukončili, preto sú možnosti kúpy obmedzené. Takéto kotle si môžu ľudia často zakúpiť len z druhej ruky, prípadne ako dopredaj skladových zásob. Všetky kotle sú podľa vplyvu na životné prostredie radené do emisných tried podľa normy ČSN EN 303-5.

Cieľom pri výbere konkrétnych kotlov bolo vybrať zástupcov rôznych kategórií. Pri výbere bolo nutné zabrániť prílišnej podobnosti kotlov. Hlavné vlastnosti, v ktorých sa mali kotle líšiť boli používané palivo, stupeň automatizácie vykurovania, predajná cena kotla a následné náklady na prevádzku. Výsledky porovnávacieho výpočtu potom budú dávať relevantné informácie nie len pre konkrétne kotle, ale aj pre samotnú typovú skupinu kotlov. Záverom by mal byť prehľad o rôznych možných variantách, z ktorých si následne užívateľ bude môcť sám vybrať druh kotla a palivo vzhľadom na jeho preferované požiadavky. Všetky kotle boli volené zo sledovanej kategórie kotlov malých výkonov pre rodinné domy. Zvolenými kotlami pre porovnávací výpočet sú:

- Automatický kombinovaný kotol VIGAS 12DPA
- Prehorievací kotol Viadrus Hercules U26 ECO
- Splyňovací kotol ATMOS C15S

Na porovnávacie výpočty vybraných kotlov bol zvolený rodinný dom, ktorý sa nachádza v horskom prostredí na Slovensku v okrese Banská Bystrica v nadmorskej výške 630 metrov nad morom. Doba kúrenia v tejto lokalite je odhadom od konca septembra do začiatku mája, to znamená približne 230 dní. Dom je dvojposchodový s oddelenou kotolňou a pivnicou, v ktorých sa nekúri, preto nebudú brané do úvahy. Rozloha jedného poschodia je  $70 \text{ m}^2$ , výška stropu miestností na oboch poschodiach je 3 metre. Je to staršia prerábaná stavba s hrubými kamennými múrmi. Obvodové múry nemajú žiadnu tepelnú izoláciu, na celom dome sú však vymenené plastové dvojsklové okná a strecha s vrstvou izolačnej minerálnej vlny. Napriek tomu bude strata cez steny značná, čo výrazne ovplyvní výsledky. Konkrétne boli podľa internetovej kalkulačky TZB vypočítané približné straty domu na 17,1 kW, pričom steny sa na tejto strate podieľajú až 70-timi percentami z celkovej energie. [41] Priemerná teplota počas vykurovacej sezóny v danej lokalite je  $2,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , vonkajšia výpočtová teplota je  $-15 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a priemerná vnútorná výpočtová teplota požadovaná v objekte bude stanovená na  $21 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . [38] Kotol taktiež prispieva ku ohrevu teplej úžitkovej vody. Podľa TZB kalkulačky na výpočet potrebného tepla je kombinovaná spotreba na kúrenie a ohrev teplej vody stanovená na hodnotu  $Q_{rok} = 174,9 \text{ GJ/rok}$ , čo predstavuje 48,6 MWh/rok. [42] Cena elektrickej energie podľa sadzovníka dodávateľa elektriny je stanovená na  $C_e = 0,175 \text{ eur/kWh}$ . [43]

#### 4.1 Automatický kombinovaný kotol VIGAS 12DPA

Teplovodný kotol na tuhé palivo vyrábaný slovenskou firmou VIMAR. Je plne automatizovaný a kombinuje dva druhy spaľovania. Tými sú splyňovanie kusového dreva a klasické spaľovanie peliet na rošte. Kotol dokáže prívodom vzduchu automaticky regulovať výkon od 10 % do 100 % pre pelety a od 30 % do 100 % pre drevo. Taktiež dokáže automaticky po vyčerpaní ručne prikladaného dreva prejsť do režimu spaľovania peliet. Pelety sú zo zásobníka do spaľovacej komory privádzané párom šnekových dopravníkov. Vzniknuté spaliny sú ochladzované v tepelnom výmenníku.

Samotný zásobník na pelety má objemom 225 litrov a v závislosti od požadovaného výkonu vystačí kotlu na prevádzku až na 7 dní. Doporučeným primárnym palivom sú drevené pelety normovaných rozmerov, priemer 6 mm a dĺžka do 40 mm. Pelety vyrábané z iných materiálov, ako napríklad slama, sú podľa výrobcu nevhodné na spaľovanie. Sekundárne palivo, ktorým je kusové drevo, by malo spĺňať rozmery do dĺžky 370 mm a priemer 20 cm. Maximálna vlhkosť dreva by mala byť 20 %. Objem plniacej komory na drevo je až 80 litrov, čo vystačí kotlu na kúrenie na niekoľko hodín. Z kotla je nutné zhruba raz za týždeň ručne odstraňovať vzniknutý popol. [32]

Použitým palivom pre porovnávacie výpočty budú štandardné drevené pelety s výhrevnosťou 18 MJ/kg a cenou 0,22 eur/kg [44] a kusové smrekové drevo s výhrevnosťou 15,3 MJ/kg a cenou 0,14 eur/kg. [45]

- Menovitý výkon kotla: pre drevo  $P_1 = 16$  kW, pre pelety  $P_2 = 12$  kW
- Účinnosť kotla:  $\eta_1 = 89,6$  % pre drevo,  $\eta_2 = 90,54$  % pre pelety
- Spotreba paliva: drevo 4,2 kg/hod, pelety 2,8 kg/hod
- Elektrický príkon:  $P_{e1} = 40$  W
- Trieda kotla: 5
- Trieda energetickej účinnosti: A+
- Cena: 2640 eur [36]
- Výhrevnosť paliva:  $H_1 = 15,3$  MJ/kg drevo,  $H_2 = 18$  MJ/kg pelety
- Cena paliva:  $C_{p1} = 0,14$  eur/kg drevo,  $C_{p2} = 0,22$  eur/kg pelety



Obrázok 14: Automatický kotol VIGAS 12DPA [32]

## 4.2 Prehoriavací kotol Viadrus Hercules U26 ECO na uhlie

Tento kotol je dostupný v niekoľkých výkonnostných variantách v závislosti na počte článkov. Pre moje porovnanie bola vybraná 4 článková verzia o výkone 15 kW. Kotol je liatinový s ručným prikladaním paliva a s prehoriavacou technológiou spaľovania. V mojom porovnávaní bude kotol plniť úlohu finančne menej náročnej varianty na prvotnú investíciu. Prednostne je určený k ekologickému spaľovaniu koksu, ako náhradné palivo sa však môže použiť aj čierne uhlie alebo drevo. Kotol spadá do emisnej triedy 3, spĺňa teda aj nadchádzajúce emisné limity na rok 2022. Kapacita spaľovacej komory je 20 kg, čo pri spotrebe paliva pre menovitý výkon vydrží na 5 až 6 hodín kúrenia. [33]

Ako bolo spomenuté vyššie, väčšina prehoriavacích a odhoriavacích kotlov je vytláčaná z ponuky kotlami splyňovacími. Firma Viadrus už oficiálne ukončila výrobu tohto typu kotla pre český trh, kotol je však stále dostupný pri viacerých predajcoch. Fakt, že je kotol stále v ponuke, umožnil zaradiť kotol do porovnania.

Použitým palivom pre výpočty bude koks so zrnitosťou 20 - 40 mm, výhrevnosťou 26,5 MJ/kg a jednotkovou cenou 32 eur za 100 kg. [40]

- Menovitý výkon: pre 4 článkovú verziu  $P_3 = 15 \text{ kW}$
- Účinnosť kotla:  $\eta_3 = 75,9 \%$
- Spotreba paliva: 3,7 kg/hod
- Elektrický príkon:  $P_{e3} = 0 \text{ W}$
- Trieda kotla: 3
- Trieda energetickej účinnosti: D
- Cena: 1160 eur [35]
- Výhrevnosť paliva:  $H_3 = 26,5 \text{ MJ/kg}$  koks
- Cena paliva:  $C_{p3} = 0,32 \text{ eur/kg}$  koks



Obrázok 15: Prehoriavací kotol Viadrus Hercules U26 ECO [33]

### 4.3 Splyňovací kotol ATMOS C15S

Kotol je stavaný na splyňovanie primárne hnedého uhlia, ako sekundárne palivo môže byť použité drevo. Teleso kotla je tvorené dvomi komorami, kde horná má funkciu zásobníka paliva a spodná slúži na spaľovanie a ako popolník. Ku splyňovaniu dochádza medzi oboma komorami. Spaliny sú z kotla vedené odťahovým ventilátorom. Pri používaní hnedého uhlia by sa mal popol zo spaľovacej komory odstraňovať zhruba raz za deň. Regulácia prívodu vzduchu a činnosti ventilátora je štandardne realizovaná elektromechanicky pomocou regulátoru ťahu a regulačného termostatu. Výrobca ale ponúka možnosť vybaviť kotol elektronickou reguláciou na zabezpečenie plnej automatizácie riadenia celého systému vykurovania. Kotol sa vyznačuje ekologicky šetrným spaľovaním a vysokou hodnotou účinnosti. V mojom porovnaní by mal plniť úlohu strednej cesty medzi predchádzajúcimi kotlami z hľadiska nákladov a ekológie. [34]

Pre výpočty bude použitým palivom hnedé uhlie orech 1 so zrnitosťou 20 - 40 mm a výhrevnosťou 17,6 MJ/kg a cenou 15 eur za 100 kg. [46]

- Menovitý výkon:  $P_4 = 16 \text{ kW}$
- Účinnosť kotla:  $\eta_4 = 90,4 \%$
- Spotreba paliva: 3,0 kg/hod
- Elektrický príkon:  $P_{e4} = 50 \text{ W}$
- Trieda kotla: 5
- Trieda energetickej účinnosti: B
- Cena: 1525 eur [39]
- Výhrevnosť paliva:  $H_4 = 17,6 \text{ MJ/kg}$  hnedé uhlie
- Cena paliva:  $C_{p4} = 0,15 \text{ eur/kg}$  hnedé uhlie



Obrázok 16: Splyňovací kotol ATMOS C15S [34]

#### 4.4 Porovnávací výpočet nákladov na prevádzku

Pre porovnávací výpočet finančných nákladov na prevádzku jednotlivých kotlov budú použité nasledujúce rovnice: [37]

Hmotnosť kotlom spotrebovaného paliva na vykurovanie za rok sa vypočíta ako spotreba tepla podelená súčinom výhrevnosti paliva a účinnosti kotla:

$$m_i = \frac{Q_{rok}}{H_i \cdot \eta_i} \quad (10)$$

$m_i [kg]$	hmotnosť paliva potrebná na rok prevádzky kotla
$Q_{rok} [GJ \cdot rok^{-1}]$	ročná spotreba tepla (vyššie uvedených 174,9 GJ/rok)
$H_i [MJ \cdot kg^{-1}]$	výhrevnosť používaného paliva
$\eta_i [-]$	účinnosť kotla

Z toho sa následne určia ročné náklady na palivo ako súčin hmotnosti paliva a jednotkovej ceny za kilogram:

$$N_{pi} = m_i \cdot C_{pi} \quad (11)$$

$N_{pi} [eur]$	náklady na palivo za rok
$C_{pi} [eur \cdot kg^{-1}]$	cena paliva za kilogram

Prevádzková doba kotla v hodinách sa vypočíta ako pomer ročnej spotreby tepla a výkonu kotla:

$$T_i = \frac{Q_{rok}}{P_i \cdot 3600} \quad (12)$$

$T_i [h]$	prevádzková doba kotla
$P_i [W]$	výkon kotla

Celková spotreba elektrickej energie predstavuje súčin prevádzkovej doby kotla a elektrického príkonu:

$$E_i = \frac{T_i \cdot P_{ei}}{1000} \quad (13)$$

$E_i [kWh]$	ročná spotreba elektrickej energie pre kotol
$P_{ei} [W]$	elektrický príkon kotla

Náklady na elektrickú energiu sú potom súčin spotreby elektriny a jednotkovej ceny:

$$N_{ei} = E_i \cdot C_e \quad (14)$$

$N_{ei} [eur]$	náklady na elektrinu za rok
$C_e [eur \cdot kWh^{-1}]$	cena elektriny za kilowatthodinu

Výsledné ročné náklady sú teda súčet nákladov na palivo a nákladov na elektrinu:

$$N_{ci} = N_{pi} + N_{ei} \quad (15)$$

$N_{ci} [eur]$	výsledné náklady na prevádzku kotla za rok
----------------	--

#### 4.4.1 Výpočet nákladov pre kotol VIGAS 12DPA

##### Splyňovanie dreva:

Spotreba paliva:  $m_1 = \frac{Q_{rok}}{H_1 \cdot \eta_1} = \frac{174,9 \cdot 10^9}{15,3 \cdot 10^6 \cdot 0,896} = 12758,2 \text{ kg}$

Náklady na palivo:  $N_{p1} = m_1 \cdot C_{p1} = 12758,2 \cdot 0,14 = 1786,1 \text{ eur}$

Prevádzková doba kotla:  $T_1 = \frac{Q_{rok}}{P_1 \cdot 3600} = \frac{174,9 \cdot 10^9}{16 \cdot 10^3 \cdot 3600} = 3036,5 \text{ h}$

Spotreba elektriny:  $E_1 = \frac{T_1 \cdot P_{e1}}{1000} = \frac{3036,5 \cdot 40}{1000} = 121,5 \text{ kWh}$

Náklady na elektrinu:  $N_{e1} = E_1 \cdot C_e = 121,5 \cdot 0,175 = 21,3 \text{ eur}$

Celkové ročné náklady:  $N_{c1} = N_{p1} + N_{e1} = 1786,1 + 21,3 = \mathbf{1807,4 \text{ eur}}$

##### Spaľovanie peliet:

Spotreba paliva:  $m_2 = \frac{Q_{rok}}{H_2 \cdot \eta_2} = \frac{174,9 \cdot 10^9}{18 \cdot 10^6 \cdot 0,9054} = 10731,9 \text{ kg}$

Náklady na palivo:  $N_{p2} = m_2 \cdot C_{p2} = 10731,9 \cdot 0,22 = 2361 \text{ eur}$

Prevádzková doba kotla:  $T_2 = \frac{Q_{rok}}{P_2 \cdot 3600} = \frac{174,9 \cdot 10^9}{12 \cdot 10^3 \cdot 3600} = 4048,6 \text{ h}$

Spotreba elektriny:  $E_2 = \frac{T_2 \cdot P_{e1}}{1000} = \frac{4048,6 \cdot 40}{1000} = 161,9 \text{ kWh}$

Náklady na elektrinu:  $N_{e2} = E_2 \cdot C_e = 161,9 \cdot 0,175 = 28,3 \text{ eur}$

Celkové ročné náklady:  $N_{c2} = N_{p2} + N_{e2} = 2361 + 28,3 = \mathbf{2389,3 \text{ eur}}$

#### 4.4.2 Výpočet nákladov pre kotol Viadrus Hercules U26 ECO

Spotreba paliva:  $m_3 = \frac{Q_{rok}}{H_3 \cdot \eta_3} = \frac{174,9 \cdot 10^9}{26,5 \cdot 10^6 \cdot 0,759} = 8695,7 \text{ kg}$

Náklady na palivo:  $N_{p3} = m_3 \cdot C_{p3} = 8695,7 \cdot 0,32 = 2782,6 \text{ eur}$

Prevádzková doba kotla:  $T_3 = \frac{Q_{rok}}{P_3 \cdot 3600} = \frac{174,9 \cdot 10^9}{15 \cdot 10^3 \cdot 3600} = 3238,9 \text{ h}$

Spotreba elektriny:  $E_3 = \frac{T_3 \cdot P_{e3}}{1000} = \frac{3238,9 \cdot 0}{1000} = 0 \text{ kWh}$

Náklady na elektrinu:  $N_{e3} = E_3 \cdot C_e = 0 \cdot 0,175 = 0 \text{ eur}$

Celkové ročné náklady:  $N_{c3} = N_{p3} + N_{e3} = 2782,6 + 0 = \mathbf{2782,6 \text{ eur}}$

#### 4.4.3 Výpočet nákladov pre kotol ATMOS C15S

Spotreba paliva:  $m_4 = \frac{Q_{rok}}{H_4 \cdot \eta_4} = \frac{174,9 \cdot 10^9}{17,6 \cdot 10^6 \cdot 0,904} = 10992,8 \text{ kg}$

Náklady na palivo:  $N_{p4} = m_4 \cdot C_{p4} = 10992,8 \cdot 0,15 = 1648,9 \text{ eur}$

Prevádzková doba kotla:  $T_4 = \frac{Q_{rok}}{P_4 \cdot 3600} = \frac{174,9 \cdot 10^9}{16 \cdot 10^3 \cdot 3600} = 3036,5 \text{ h}$

Spotreba elektriny:  $E_4 = \frac{T_4 \cdot P_{e4}}{1000} = \frac{3036,5 \cdot 50}{1000} = 151,8 \text{ kWh}$

Náklady na elektrinu:  $N_{e4} = E_4 \cdot C_e = 151,8 \cdot 0,175 = 26,6 \text{ eur}$

Celkové ročné náklady:  $N_{c4} = N_{p4} + N_{e4} = 1648,9 + 26,6 = 1675,5 \text{ eur}$

#### 4.5 Záverečné zhodnotenie výsledkov

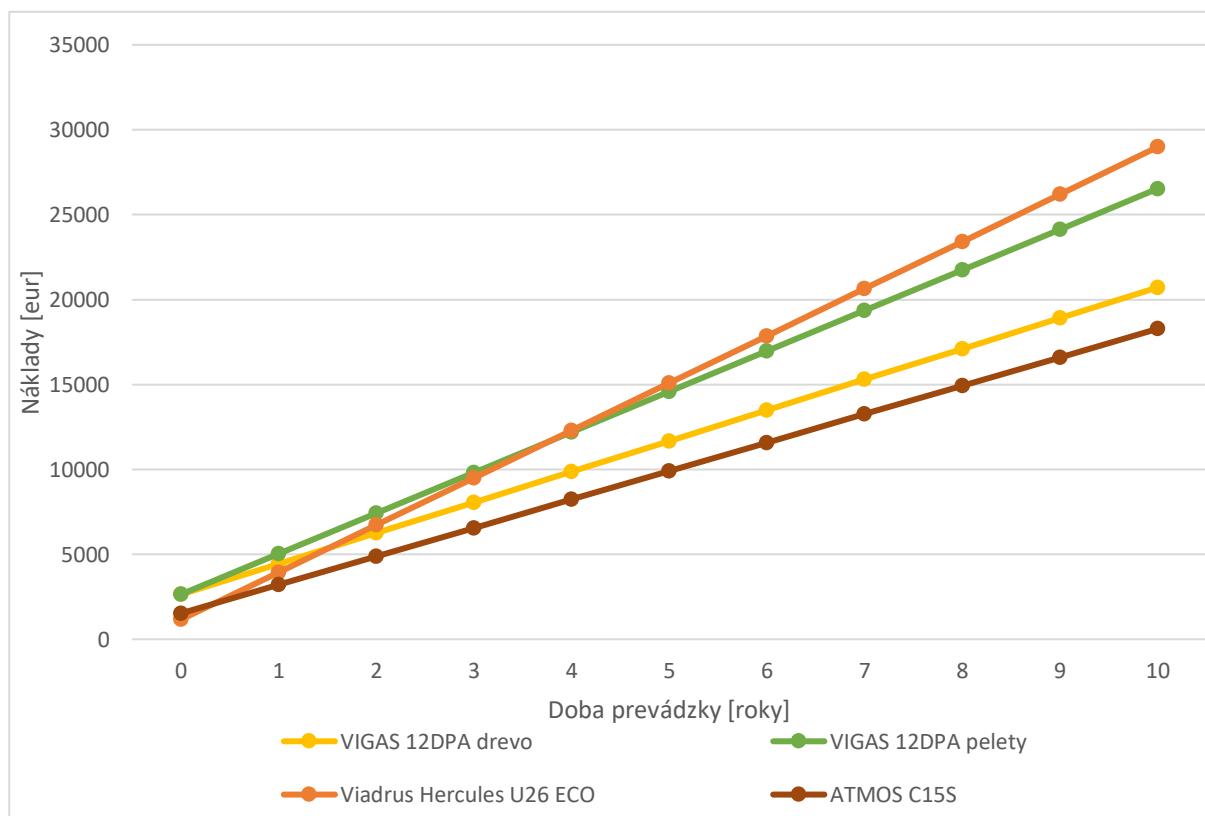
Porovnanie jednotlivých kotlov dopadlo z väčšej časti podľa očakávaní. Spotreba elektrickej energie vo všetkých prípadoch tvorila takmer zanedbateľné percento nákladov. Najnižšie celkové prevádzkové náklady pre jeden rok používania pripadli na splyňovací kotol Atmos na hnedé uhlie. Hlavným dôvodom je relatívne nízka cena paliva a zároveň veľmi vysoká účinnosť kotla. Druhé najvýhodnejšie vyšlo splyňovanie dreva kotlom Vigas, čo len potvrdzuje vysokú efektivitu technológie splyňovania. Spaľovanie peliet je už výrazne drahšie, čo je dané vyššou cenou peliet oproti drevu a hnedému uhliu. Prekvapivo najdrahšie vyšla prevádzka prehorievacieho kotla Viadrus. Prejavila sa tu jeho výrazne nižšia účinnosť, vysoké náklady boli ale zapríčinené hlavne použitím drahého koksu. Koks bol použitý na základe toho, že ho výrobca označil ako primárne palivo pre daný kotol. Pre zredukovanie ročných nákladov by bolo možné nahradiť koks napríklad kusovým drevom, kde by sa náklady zredukovali o zhruba 675 eur, zároveň by ale stúpla spotreba paliva na takmer dvojnásobok.

	VIGAS 12DPA drevo	VIGAS 12DPA pelety	Viadrus Hercules U26 ECO	ATMOS C15S
výkon [kW]	16	12	15	16
účinnosť [%]	89,6	90,54	75,9	90,4
technológia spaľovania	splyňovanie	spaľovanie	prehorievanie	splyňovanie
použité palivo	drevo	pelety	koks	hnedé uhlie
trieda energetickej účinnosti	A+	A+	D	B
cena kotla [eur]	2640	2640	1160	1525
cena elektrickej energie [eur]	21,3	28,3	0	26,6
cena paliva [eur/kg]	0,14	0,22	0,32	0,15
ročná spotreba paliva [kg]	12 758,2	10 731,9	8 695,7	10 992,8
celkové ročné náklady [eur]	1807,4	2389,3	2782,6	1675,5

Tabuľka 6: Porovnanie vybraných kotlov



Dôležitá je aj prvotná investícia spojená s kúpou kotla, kde kotol Vigas je o 1480 eur drahší ako najlacnejší kotol Viadrus a o 1115 eur drahší ako kotol Atmos. Z hľadiska financií minútých na vykurovanie v priebehu rokov je najvýhodnejšou variantou kotol Atmos, najhoršie aj napriek nízkej predajnej cene vyjde prehovievací kotol Viadrus s použitím koksu. Náklady v priebehu rokov rastú lineárne a ich vývin pre 10 rokov používania zobrazuje graf 4.



Graf 4: Porovnanie finančných nákladov na prevádzku kotlov v priebehu rokov

Všeobecne sa nedá jednoznačne určiť, ktorý z vybraných kotlov je najlepšou voľbou. Všetky majú svoje klady a zápory. Kotol Vigas napríklad disponuje možnosťou automatického prechodu na spaľovanie peliet po vyčerpaní dreva, za čo si však zákazník výrazne priplatí. Kotol Viadrus má síce najnižšiu predajnú cenu, náklady na jeho prevádzku sú však už po piatom roku používania najvyššie. Kotol je výhradne manuálny, takže komfort používania oproti zvyšným dvom kotlom je taktiež minimálny. Kotol Atmos zase používa hnedé uhlie, ktoré v porovnaní s drevenými peletami nie je najkomfortnejšie na manipuláciu a skladovanie a keďže obsahuje síru, taktiež má značne väčší dopad na životné prostredie. Mojm odporúčením pri výbere kotla by bolo zamerať sa na splyňovacie kotle aj napriek ich vyššej cene, hlavne kvôli nízkym emisiám a efektívnemu využitiu paliva. V priebehu rokov sa takáto alternatíva vyplatí aj finančne. Pri prihliadnutí na všetky vyššie spomenuté ekologické a ekonomické faktory je pre mňa z porovnávanej trojice najideálnejšou alternatívou kombinovaný kotol Vigas.

## Záver

Bakalárska práca mala 4 ciele: previesť rešerš dostupných tuhých palív, rozobrať vlastnosti sledované pri tuhých palivách a ich vplyv na kvalitu spaľovania, vytvoriť prehľad kotlov na tuhé palivá podľa rôznych kategórií a v závere previesť porovnávací výpočet ekonomických nákladov konkrétnych druhov kotlov vzťahnutý na zvolený rodinný dom.

Prvá časť bola venovaná dvom hlavným tuhým palivám, biomase a uhlíu. Priblížené boli ich rôzne druhy a formy, v akých sa používajú. V kapitole boli spomenuté základné vlastnosti, spôsob ich získavania, respektíve výroby, a aj výhody a nevýhody ich používania. Taktiež boli spomenuté alternatívne tuhé palivá ako možnosť využitia odpadu

V druhej časti boli z technického hľadiska riešené vlastnosti tuhých palív ako výhrevnosť a spalné teplo. Taktiež boli uvedené rovnice na ich výpočet, prípadne spomenuté experimentálne formy zistenia ich hodnôt. Priestor bol venovaný aj zloženiu palív a vplyvu jednotlivých zložiek na ich celkové vlastnosti a následne na horenie daného paliva.

Tretia kapitola sa venovala kotlom na tuhé palivá. Rozdeľovala kotle do rôznych kategórií podľa technológie spaľovania, druhu použitého paliva a podľa stupňa automatizácie spaľovacieho procesu. Boli spomenuté výhody a nevýhody každého typu kotla a základné potreby spojené z ich obsluhou.

V poslednej štvrtej kapitole bol prevedený výpočet finančných nákladov troch konkrétnych kotlov od rôznych výrobcov a s rôznym konštrukčným prevedením a použitým palivom. Jednotlivé kotle tak mali byť charakteristickými zástupcami jednotlivých skupín. Kotle mali spadať do rovnakej výkonnostnej kategórie a mali slúžiť na vykurovanie zvoleného rodinného domu. Výpočet nákladov bol spočítaný pre jeden rok používania. Následné grafické zobrazenie vykresľuje vývoj nákladov potrebných na kúrenie s daným kotlom v priebehu 10 rokov.

Vo výslednom porovnaní vyšla prevádzka najlacnejšie pre splyňovací kotol Atmos C15S na hnedé uhlie, mierne drahšie bolo splyňovanie dreva v kotle Vigas. Spaľovanie peliet taktiež v kotle Vigas už vyšlo značne drahšie, hlavným dôvodom je vyššia cena peliet oproti drevu alebo uhlíu. Pri častejšom využívaní spaľovania peliet by náklady kombinovaného kotla Vigas ešte stúpili. Hnedé uhlie má ale výrazne vyšší vplyv na životné prostredie v porovnaní s palivami z biomasy. Preto by po zahrnutí emisného faktoru kotol Vigas vyšiel z porovnania lepšie ako kotol Atmos. Zástupcom starších a jednoduchších konštrukčných riešení kotlov bol prehorievací kotol Viadrus. Ten v mojom porovnaní napriek jeho nízkej cene dopadol najhoršie aj z hľadiska ekonomiky a ako manuálny kotol aj z hľadiska komfortu používania. Dôvodom bola vysoká cena koksu a zároveň nízka účinnosť kotla. Výsledkom porovnania teda je, že splyňovanie je dominantné pri moderných kotloch na tuhé palivá oprávnené, pretože vykazuje výborné výsledky v spotrebe paliva a zároveň šetrí životné prostredie.

## Zoznam použitých zdrojov

- [1] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [2] QUASCHNING, Volker. *Obnovitelné zdroje energií*. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-247-3250-3.
- [3] KLOBUŠNÍK, Lubomír. *Pelety – palivo budoucnosti*. Sdružení HARMONIE, 2003. ISBN 978-80-239-19563
- [4] NOSKIEVIČ, Pavel. *Biomasa a její energetické využití*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1996. Phare, Svazek 23. ISBN 80-7078-367-2.
- [5] NOSKIEVIČ, Pavel. *Využití energetických zdrojů*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1996. Phare, Svazek 44. ISBN 80-7078-378-8.
- [6] KAMEŠ, Josef. *Fosilní paliva*. Vyd. 2. Praha, 2012. ISBN 978-80-260-3499-5
- [7] O spalování tuhých paliv v lokálních topeništích. *Energetika.tzb-info.cz* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/8618-o-spalovani-tuhych-paliv-v-lokalnich-topenistich-1>
- [8] Antracit. *Geologie.vsb.cz* [online]. [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/loziska/energysur/antracit.html>
- [9] Ložiská nerostů - energetické suroviny. *Geologie.vsb.cz* [online]. [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: [http://geologie.vsb.cz/loziska/loziska/loziska\\_energetickych\\_surov.html#%C4%8CERN%C3%89%20UHL%C3%8D](http://geologie.vsb.cz/loziska/loziska/loziska_energetickych_surov.html#%C4%8CERN%C3%89%20UHL%C3%8D)
- [10] Antracit. *Resorbent.cz* [online]. [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <https://www.resorbent.cz/antracit>
- [11] Slovenské drevné uhlie. *Bge.sk* [online]. [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <https://bge.sk/uhlie-koks-brikety/slovenske-drevne-uhlie-324.html>
- [12] Úvodem o koksu. *Koksovny.cz* [online]. [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <http://www.koksovny.cz/cz/uvodem-o-koksu>
- [13] Organické usadené horniny. *Virtual-lab.sk* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://www.virtual-lab.sk/claroline196/courses/OUH/>
- [14] Prodej koksu. *Uhli-zabreh.cz* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://uhli-zabreh.cz/prodej-tuhych-paliv-sumpersko/koks-zabreh-stity-libina-hanusovice/>
- [15] Brikety. *Ekopalenergy.sk* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://www.ekopalenergy.sk/brikety/>
- [16] Drevené pelety. *Etopalalternativeenergy.sk* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <https://etopalalternativeenergy.sk/produkt/drevene-pelety-6mm-40-50mm-akost-a1/>

- [17] Výroba tuhého alternativního paliva. *Mariuspedersen.sk* [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <https://www.mariuspedersen.sk/sluzby/vyroba-tuheho-alternativneho-paliva/>
- [18] Tuhé alternativne palivo má konečne zelenú. *Odpady-portal.sk* [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <https://www.odpady-portal.sk/Dokument/101847/tuhe-alternativne-palivo-ma-konecne-zelenu.aspx>
- [19] Jak to vypadá u nás s výrobou tuhých alternativních paliv TAP?. *Prumyslovaekologie.cz* [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://www.prumyslovaekologie.cz/Dokument/103793/jak-to-vypada-u-nas-s-vyrobou-tuhych-alternativnich-paliv-tap.aspx>
- [20] Produkcia emisií pri spaľovaní dreva v závislosti na jeho vlhkosti. *Vytapeni.tzb-info.cz* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/17230-produkcia-emisii-pri-spalovani-dreva-v-zavislosti-na-jeho-vlhkosti>
- [21] Energie biomasy. *Ekowatt.cz* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://ekowatt.cz/cz/informace/obnovitelne-zdroje-energie/energie-biomasy>
- [22] Přepočty jednotek dřeva. *bspholding.cz* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www.bspholding.cz/bukove-drevo.html>
- [23] Účinnost spalovacích zařízení. *vec.vsb.cz* [online]. [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <http://vec.vsb.cz/katalog-obrazku/clanek-115/197-ucinnost-1.pdf>
- [24] KOLONIČNÝ, Jan, HORÁK Jiří, PETRÁNKOVÁ ŠEVČÍKOVÁ Silvie. *Kotle malých výkonů na pevná paliva*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. 105 s. ISBN 978-80-248-2542-7.
- [25] Jak si doma změřit účinnost spalovacího zařízení a lze účinnost nějak zvětšit?. *Vytapeni.tzb-info.cz* [online]. [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/9434-jak-si-doma-zmerit-ucinnost-spalovaciho-zarizeni-a-lze-ucinnost-nejak-zvetsit>
- [26] Jak vybírat nový kotel na pevná paliva. *Vytapeni.tzb-info.cz* [online]. [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/9798-jak-vybirat-novy-kotel-na-pevna-paliva-1>
- [27] Tabulka výhřevností paliv. *Agro-biomasa.cz* [online]. [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <http://www.agro-biomasa.cz/paliva>
- [28] Teplovodný kotel VIGAS 25 s reguláciou AK4000. *Vimar.sk* [online]. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://www.vimar.sk/?u1=kotlyvodne&u2=vigas025&jazyk=sk>
- [29] DUFKA, Jaroslav. *Hospodárné vytápění domů a bytů*. 1. vyd. Praha: Grada, 2007. 112 s. ISBN 978-80-247-2019-7.
- [30] How to make your fireplace more efficient. *logskentandsussex.co.uk* [online]. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://www.logskentandsussex.co.uk/how-to-make-your-fireplace-more-efficient/>

- [31] Moderné krbové vložky. *northerndefenders.org* [online]. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://northerndefenders.org/krby/moderne-krbove-vlozky/>
- [32] Teplovodný kotol VIGAS 12DPA s reguláciou AK 4000. *Vimar.sk* [online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <http://www.vimar.sk/?u1=kotlyvodne&u2=vigas012dpa&jazyk=sk>
- [33] Kotle s ručným príkládáním. *Viadrus.cz* [online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <https://www.viadrus.cz/kotle-s-rucnim-prikladanim/litinovy-prohorivaci-kotel-hercules-u26-eco-28-cz4.html>
- [34] zplynovací kotle na hnědé uhlí (dřevo). *Atmos.cz* [online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <https://www.atmos.eu/zplynovaci-kotle-na-uhli-drevo/>
- [35] Liatinové kotly-Viadrus Hercules U26 ECO-4. *mpg-steel.sk* [online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <http://mpg-steel.sk/lacny-liatinovy-kotol-4-clankovy-viadrus-hercules-u26-eco-mpg-steel.php>
- [36] Drevosplyňujúce kotly. *Vimar.sk* [online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <http://www.vimar.sk/text-sk/podpora/cennik%20kotlov%202019.pdf>
- [37] JANDAČKA, Jozef a Milan MACHO. *Biomasa ako zdroj energie*. 1. vyd. Žilina: GEORG, 2007. ISBN 978-80-969161-4-6.
- [38] Vonkajšia výpočtová teplota pre mestá na Slovensku. *stavebnictvo.sk* [online]. [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <http://stavebnictvo.sk/profiles/blogs/vonkajsia-vypoctova-teplota>
- [39] Atmos cenník 2019. *Deltastav.sk* [online]. [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <https://www.deltastav.sk/atmos/cennik.html>
- [40] Cenník. *ptp.sk* [online]. [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <http://www.ptp.sk/>
- [41] On-line kalkulačka úspor a dotací Zelená úsporám. *Stavba.tzb-info.cz* [online]. [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/128-on-line-kalkulacka-uspor-a-dotaci-zelena-usporam>
- [42] Potřeba tepla pro vytápění a ohřev teplé vody. *Vytapeni.tzb-info.cz* [online]. [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/47-potreba-tepla-pro-vytapani-a-ohrev-teple-vody>
- [43] Aká je moja vhodná sadzba elektriny. *sse.sk* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: [https://www.sse.sk/domacnosti/elektrina/sadzba?page\\_id=7966](https://www.sse.sk/domacnosti/elektrina/sadzba?page_id=7966)
- [44] *Biopel.sk* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: [http://www.biopel.sk/images/stories/CENNIKY/pelety\\_cennik\\_od\\_15.04.2019\\_jarne\\_ceny\\_web.pdf](http://www.biopel.sk/images/stories/CENNIKY/pelety_cennik_od_15.04.2019_jarne_ceny_web.pdf)
- [45] *Lesy.sk* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.lesy.sk/files/lesy/www-stranky-oz/cadca/cennik-od-1-1-2018.pdf>
- [46] Ceník tuhých paliv. *Uhli-zabreh.cz* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <http://uhli-zabreh.cz/prodej-tuhych-paliv-sumpersko/cenik-tuhych-paliv-sumpersko/>

## Zoznam symbolov

$h$	obsah horľaviny v palive
$A^r$	obsah popoloviny v palive
$W^r$	obsah vody v palive
$Q_i^r [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	výhrevnosť paliva
$Q_s [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	spalné teplo
$H_2$	obsah vodíku v palive
$r [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	výparné/kondenzačné teplo vody
$C^r, O^r, S^r$	obsahy jednotlivých prvkov
$\bar{S} [\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}]$	merná sírnatosť
$S [\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}]$	pomerný obsah síry
$\eta [-]$	účinnosť
$P_v [\text{kW}]$	výkon
$P_p [\text{kW}]$	príkon
$m_v [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	množstvo vody
$c_v [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$	merná tepelná kapacita vody
$\Delta t [^\circ\text{C}]$	teplotný rozdiel vody
$m_{paliva} [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	množstvo paliva pridávané za sekundu
$\sum_1^i Z_i [\text{kW}]$	suma energetických strát
$Q_{rok} [\text{GJ} \cdot \text{rok}^{-1}]$	ročná spotreba tepla
$m_i [\text{kg}]$	hmotnosť paliva potrebná na rok prevádzky kotla
$H_i [\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	výhrevnosť používaného paliva
$N_{pi} [\text{eur}]$	náklady na palivo za rok
$C_{pi} [\text{eur} \cdot \text{kg}^{-1}]$	cena paliva za kilogram
$T_i [\text{h}]$	prevádzková doba kotla
$P_i [\text{W}]$	výkon kotla
$E_i [\text{kWh}]$	ročná spotreba elektrickej energie pre kotol
$P_{ei} [\text{W}]$	elektrický príkon kotla
$N_{ei} [\text{eur}]$	náklady na elektrinu za rok
$C_e [\text{eur} \cdot \text{kWh}^{-1}]$	cena elektriny za kilowatthodinu
$N_{ci} [\text{eur}]$	výsledné náklady na prevádzku kotla za rok